Kobe University Repository : Thesis

学位論文題目 Title	自律分散型機械加工システムに関する研究
氏名 Author	樋野, 励
専攻分野 Degree	博士(工学)
学位授与の日付 Date of Degree	2001-09-21
Resource Type	Thesis or Dissertation / 学位論文
学位記番号 （請求記号） Call Number	工博-ろ-233 (社会科学系図書館)
URL	http://www.lib.kobe-u.ac.jp/handle_gakui/D2002566

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。
著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。

Create Date: 2015-11-06

自律分散型機械加工システムに関する研究

樋野 励

目 次

第 1 章　緒論 **1**
1.1 研究の背景 1
1.2 研究の目的および本論文の構成 2

第 2 章　生産システムのモデル化 **4**
2.1 緒言 4
2.2 システムとシステム要素 4
2.3 生産システム 6
2.3.1 工廠方式・フォード式生産システム 6
2.3.2 トヨタ式生産システム・SCM 8
2.3.3 分散型生産システム 9
2.3.4 自律分散型生産システム 10
2.3.5 システム要素のもつシステムの性質 11
2.4 ホロニック生産システム 11
2.4.1 ホロンとホラーキィ 12
2.4.2 従来のホロンの解釈 13
2.4.3 自律分散型生産システムの問題点 14
2.5 ホロニック生産システム概念 15
2.5.1 生産システムのホラーキィ 15
2.5.2 ホロンのモデル化 16
2.5.3 自律と協調 17
2.5.4 ホロンと非(ノン)ホロン 18
2.5.5 自己相似性と隠蔽性 19
2.5.6 頑強性と柔軟性 20
2.6 結言 20

第 3 章　システムとしての工作機械 **23**
3.1 緒言 23
3.2 工作機械の構成 23
3.2.1 工作機械内部における物の流れと情報の流れ 24
3.2.2 工作機械の論理構成 26
3.3 工具摩耗量のインプロセス推定 28
3.3.1 AE 信号とコーティング工具 28
3.3.2 実験装置および実験条件 29

3.3.3 ニューラル・ネットワークの構造 31
3.4 ニューラル・ネットワークの学習方法 34
3.4.1 特徴量 36
3.4.2 実験結果および工具摩耗の推定結果 38
3.5 熱変形による加工誤差の推定と補正 47
3.5.1 オープンアーティテクチャCNC 47
3.5.2 工作機械の熱変形と熱変形予測モデル 48
3.5.3 実験条件および実験方法 50
3.5.4 実験結果および熱変形補正結果 50
3.6 結言 52

第 4 章 システム要素としての工作機械 58
4.1 緒言 58
4.1.1 スケジューリング問題と工程設計 58
4.1.2 分散管理とスケジューリング 59
4.2 ジョブショップスケジューリング問題 62
4.2.1 用語の説明 62
4.2.2 前提条件 63
4.3 再帰的伝播法による機械間の情報交換 64
4.3.1 再帰的伝播法 64
4.3.2 情報交換手順 64
4.3.3 情報交換手順の改善 67
4.3.4 再帰的伝播法による情報交換の例 67
4.3.5 改善した再帰的伝播法による情報交換の例 68
4.4 計算例 73
4.4.1 情報交換回数の評価 73
4.4.2 再帰的伝播法を用いたスケジューリング 75
4.4.3 再帰的伝播法の適用範囲 77
4.4.4 再帰的伝播法の実装例 79
4.5 結言 82

第 5 章 システムとシステム要素としての工作機械 86
5.1 緒言 86
5.2 システムの階層構造とジョブショップスケジューリング問題 86
5.2.1 システムとシステム要素 86
5.2.2 階層型ジョブショップスケジューリング問題 88
5.2.3 用語の説明 91
5.2.4 システムとシステム要素の関係 91
5.2.5 スケジューリング手順 92
5.2.6 スケジューリング改善案の評価 93
5.3 階層分散型生産システムにおける情報交換 94
5.3.1 システム要素の分散管理 94

5.3.2 再帰的伝播法による情報交換 95
5.3.3 再帰的伝播法の拡張 95
5.4 計算例 101
5.5 システムの柔軟性・頑強性と再帰的伝播法 103
5.6 結言 105

第 6 章 結論 **107**

第1章　緒論

1.1　研究の背景

情報網の発達により、消費者は市場にある製品の中から自分にとって好ましいものを選択できるようになり、また同時に企業は市場の動きから消費者が望んでいるものを知ることができるようになっている。この動きは、インターネットに代表される情報網の発達によりさらに急速に進みつつある。

製品に対する消費者の反応を瞬時に把握することが可能になっていることから、企業の市場に投入する製品の開発と製造に対する姿勢が変りつつある。たとえば、成熟していない技術であっても市場に導入し、消費者の反応を見つつ技術の改良や新技術の開発を行ない、状況によっては開発の中止や仕様の変更を行う傾向が見られる。消費者についても企業と同様の傾向が見られる。すなわち、市場に投入された製品の情報を十分な検討も行なわないうちから購入し、場合によっては、すでに類似の機能の製品を持っていても、新しい製品の購入を行う場合が多く見られる。

一般には、消費者の嗜好は千差万別であるため、企業はそれに対応する必要があるように論述される傾向がある。しかし、 商品の開発の指導権に関して言えば、消費者と企業のどちらが握っているかを明確にすることは難しい。消費者の要求から製品が生まれることも、企業によって流行が作りだされることもあるためである。しかしながら、市場に流通する製品の種類は膨大になり、その寿命は極めて短くなっていることは事実である。そのため、 製造の形態は今までのように、大量に生産することで高品質で安価な製品を作りだすことは出来なくなってきている。いわゆる大量生産から多品種少量あるいは変種変量生産への移行は、以前から指摘されてきているが、現実にそのような移行を求められる状況になっている。

生産効率を高める動き、あるいは生産形態を見直す試みは、我々人類が物を造り出し始めた時から常に行われている行為である。この歴史をまとめることは容易ではないが、本論文では、工作機械を中心とした生産システムについて、これまでの生産システムの形態に基づいて、工作機械の持つ機能の高度化と新しい生産システムに関する検討を行う。

次世代の生産には、製品の仕様変更が頻繁に行われるような製造、あるいは短期間での新製品の製造に対して、大量生産と同程度かそれ以下のコストで生産活動を行うことが望まれる。そのためには、工作機械など生産設備の高度化を進めるか、あるいは所有する機械の使用方法を変えることにより生産システムの高度化を進め、さまざまな製造方法に応じることができる体制を整える必要がある。

工作機械の高度化に関する動きは、それまで作業者が手作業で行ってきた行為を機械に置き換えることからことから始まっている。この流れは、カム機構やクランク機構などに代表される機械的な機構を利用した専用機から、数値制御装置を備えた汎用機へと移り変わっている。最近では、ネットワークを利用することで、作業者が生産に必要な情報を、作業場において状況に応じて入手することを可能にする検討や、測定機器などを搭載し、その場で品質を保証した加工を行なうこ

とが可能な工作機械などの開発が行われている。また、技能の継承に関する問題点も顕在化しており、熟練作業者のもつ技能や知識を備え、加工に必要なさまざまな判断を工作機械自身が行うことを可能にする技術の検討などが行なわれている。

一方、生産形態に対しては、ベルトコンベヤが象徴する大量生産の形態から、単一の機械により全ての加工を終えることができる複合型の機械に基づいた生産方式まで、さまざまな形態の生産システムが提案されている。とくに、1970 年代からは分散型の生産システムあるいは自律分散型の生産システムなどの新しい概念に基づいた生産システムの形態が提案されている。この動きは、生物の形態を参考にするシステムをはじめとし、現在でも精力的に研究活動が行われている。しかし、新しい生産システムに対しては工作機械の機能の高度化に比べ実際の生産活動に導入されている例はほとんどない。

1.2　研究の目的および本論文の構成

次世代の生産に必要な技術は、単なる工作機械の高度化考えるだけでは不十分であり、また抽象化された工作機械の運営方法の枠組みを与える生産システムの形態を考えるだけでは十分ではない。すなわち工作機械が生産システムのなかで担う役割を十分に検討し、その位置づけを明らかにした上でシステムの形態を考え、また同時に個々の機械に求める機能を開発しなければならない。

本論文では、工作機械に代表される生産設備と生産システムとの関連を検討し、新しい工作機械の姿と要求される技術の開発を行うことを目的とする。具体的には、新しい生産システムの形態の提案に始まり、高度な情報処理に基づいた工作機械の制御技術の開発、自律的な情報処理を行う機械による協調動作に裏付けされた生産システムの自律的な運営方法についての検討を行う。

本論文は以下の章から成る。

第 2 章では、生産形態の移り変わりを概説し、新旧の生産システムの考察を行う。特に生産システムにおける物の流れと情報の流れを考察の基礎におき、現存するシステムおよび提案されているシステムの形態を分類することにより、それぞれの特徴と違いを簡単にまとめる。さらに、この検討結果に基づいて、新たな生産システムの形態を提案する。また、そのシステムの形態から期待することができるシステムの特徴的な性質について説明する。

本論文で提案する生産システムの形態はハンガリーの思想家 A. Koestler が指摘したホロンの概念に基づいている。ホロンの概念に基づくとされる生産システムは、1980 年代にも提案されているが、これには多くの誤解がある。ここでは、それらの問題点にも触れ、さらに自律と協調というシステム要素の性質に基づいて新たな展開を行う。提案する生産システムの重要な特徴は、システムとシステム要素との区別を行わないということに集約される。

第 3 章では、工作機械をシステムとして捕えることで、高度な情報処理機能を備えた工作機械の構造を明らかにすること、およびそのための情報処理の方法および工作機械の動作補償の実現方法について提案する。

具体的には、工作機械の行う処理について、物の流れと情報の流れに基づいて分析を行い、新たに付与する情報処理装置の位置づけを明確にする。その中から、材料が破壊する際に生じるアコースティックエミッションと呼ばれる現象をコーティング工具に適用し、さらにニューラルネットワークによる情報処理を利用することにより学習機能を備えた工作機械の開発例を示す。さらに、オープンアーキテクチャCNC を搭載した工作機械を利用することで、情報処理の結果に基づいて、指定された加工動作を自律的に補正することが可能な工作機械の構築例を示す。

第 4 章では、工作機械をシステム要素として捕え、個々の工作機械が互いに情報交換を行うことで、自律分散型の生産システムの構築に必要な技術の提案を行う。

具体的には、スケジューリング問題を対象に、スケジューリング問題の持つ意義と自律分散的な工作機械に求められる機能を明らかにし、再帰的伝播法と名付けた情報交換手順を提案する。提案する手法は、情報処理に求められる計算コストの点から評価し、その改良結果について言及する。提案する手法は、従来のいわゆる集中管理的なシステム運営に用いられるスケジューリング手法との比較により評価する。さらには、1 台のパーソナルコンピュータを 1 台の工作機械に見立て、複数の工作機械から成る生産システムを構築し、その実現可能性を示す。

第 5 章では、工作機械を生産システムとシステム要素の両方の側面を有するものとして捕え、第 2 章で提案した生産システムの形態に沿った工作機械に求められる情報処理方法の提案を行う。

具体的には、第 4 章で提案したスケジューリング問題を第 2 章で提案するシステムの形態に合わせて修正し、再帰的伝播法による情報交換方法を拡張する。提案する手法は、計算機シミュレーションに基づき評価することで、その妥当性と意義を明らかにする。

提案する情報交換方法は、2 章で取り上げるシステム構造を前提にしており、包含関係に基づいた階層構造を有する生産システムの高度な運営を実現する上で必要な条件のひとつとして取り扱うことが可能である。提案する手法だけでは、システムに求められるすべての性質を実現することはできないが、スケジュール調整に基礎をおいて提案する情報交換方法とシステムの柔軟性あるいは頑強性などの性質との関連について考察を加える。

第 6 章は、本論文の結論をまとめる。

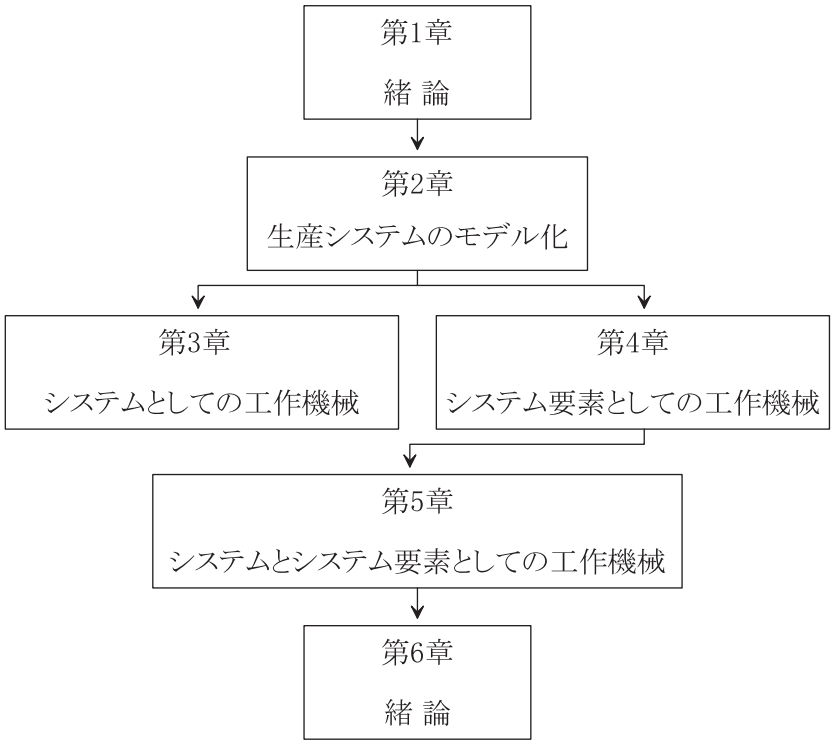


図 1.1: Structure of the present thesis

第2章　生産システムのモデル化

2.1　緒言

望ましいシステムの構築のためには、システムに求める処理内容とそのシステムの構築に用いることのできるシステム要素が持つべき機能の両方を把握することが必要である。しかしながら、システムとシステム要素の相互関係を正確に理解することはそれにもまして重要なことである。すなわち、システムに対する要求が明らかになっており、また利用できるシステム要素の仕様が明確に定義されていても、ひとつのシステム要素の挙動が、システム全体に与える影響を定量的に把握できなければ、目的のシステムの構築を行うことは実際には不可能である。このことは、システムを新規に構築する場合だけでなく、既存のシステムに与えられた目的の変更や処理効率の改善を行う場合に対しても当てはまる。

しかし、生産システムのようにシステムの構造が複雑、言い換えればシステム要素間の依存関係が複雑な場合、システムとシステム要素間の関係を理解することは一般には困難である。このことは、システム内のいくつかの問題が明らかになっている場合でも、どの問題の解決がより効果的であり優先的に取り組まれるべきかを判断することが必ずしも容易ではないことを考えれば自ずと理解できる。

このため、システムを理解するための研究は、古くから今日に至るまで永続的に行われている。すなわちすでにあるシステムのモデル化、あるいは新しい概念に基づくシステムの提案などが精力的に行われている。

本章では、システムあるいは生産システムに対する基本的な概念について概説し、また著者が提案する新しいシステム概念の説明を行う。

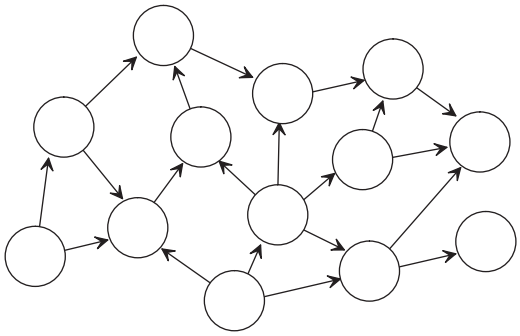
2.2　システムとシステム要素

システムに対する研究は、多くのは研究者によって古くから行われており、システムに対する定義もさまざまなものがある。たとえば、上田はシステムを「複数の要素によって構成され、それらが互いに関連し協調しながら、ある目的を実現する組織または体系」と定義している [1]。またその上で、1) 複数の構成要素を持つこと、2) 要素間に関連性があること、3) 合目的であること、を基本的な性質としてシステムが備えていることを指摘している。一方 Bjorke は、system という単語が”set together“を意味するギリシャ語の動詞に由来することから、システムを単に「A set of connected elements」と定義している [2]。しかしながら、表現が異なっていても、システムを”ふたつ以上の要素から構成される” と定義することは、多くの場合の共通の認識と言える。一方、要素 (あるいはシステム要素) に対しては、あらためて定義を行っている場合は少なく、多くの場合「全体を形づくる上で必要不可欠な根本的なものでありそれ以上簡単なものに分解できないもの」という認識で一致しているように思われる。

いずれにせよ、これらの定義から、システムは常に単体として扱われ、複数のシステム要素に分解することが可能であると認識されていることを推し量ることができる。またシステム要素は常に他の要素と同時に扱われることが多く、個々の要素はそれ以上分解することはできない反面、要素を集めることでより大きな単体であるシステムを構成することが可能であることが、暗黙の内に了解されている。

以上のことからシステムとシステム要素の一般的な認識をモデル化を行う。一般にシステムには、目的とされる出力をもち、そのための前提条件として物理的あるいは論理的な入力が与えられる。そのためシステムを図 2.1 (a) のようにモデル化して示すことができる。一方、システムが複数の要素から構成されることに着目すると、図 2.1 (b) のようにモデル化して示すことができる。このときシステム要素は互いに影響を与え合い、また連携してシステムとしての機能を果たすことになる。図 2.1 (b) 中、丸印はシステム要素を、また枝はシステム要素間が結合されている様子を示している。この図に示されるように、ひとつのシステム要素の出力は他のシステム要素の入力となる。また、システムの入力は、あるシステム要素への入力となりシステム要素の出力の重ね合わせがシステムの出力として認識される[注 1]。ここでいうシステム要素の入力あるいは出力とは、情報のような論理的なものと製品や部品のような物理的なものとを意味する。

(a) Input - output model



(b) structure of system

図 2.1: Model of system

一方、システム要素は、図 2.1(b) に示したモデルの一部を用いて 2.2 のように表現することが可能である。この図から、要素もシステムと同様に入力と出力をもつことが理解できる。

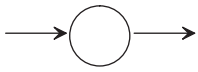


図 2.2: Model of element

このように、システムとシステム要素をモデル化すると、次の疑問が生じる。すなわち、1) シ

[注 1] システムの機能はシステム要素の単なる機能の重ねあわせではないとする主張もある。

ステム要素がこれ以上分解できないという認識は正しいか、あるいは 2) システム要素のように、システムの出力が他のシステムの入力になることを考慮しなくても良いか、ということである。この問題は、比較的古い問題ではあるが、ここでの議論は避け、次節における生産システムの分類を終えたあとで再び考察を加える。

本節では、システムとシステム要素についてもっとも基本的なことがらについて整理を行なった。本節の考察から、システムを構築するということは、目的の機能を実現するために、システム要素を結合することであり、システム要素の結合の形態がそのシステムを特徴づけることが理解できる。

2.3　生産システム

E. Merchant が指摘するように、生産システムの対象とする範囲は広く、製品個々の設計、製造、維持そして再生利用といった行為全体を捕える必要がある [3]。本節では、まず、基本的なシステムの形態を理解するために、代表的な生産システムに関して考察を行なう。ここで取り扱うシステムは、工廠方式、トヨタ式、分散型生産システムおよび自律分散型生産システムを中心とした 4 つの生産システムである。ここでは、特にシステムの形態を理解する上で重要となるシステム要素間の結合を材料、部品あるいは製品を総称して扱う物の流れ (material flow) と、図面や発注などの情報の流れ (information flow) の視点から分類する。

2.3.1　工廠方式・フォード式生産システム

ここでの生産システムの分類は、互換部品で知られる銃器の製造に始まり、FA(Factory Automation) に至る流れを代表するシステム形態に着目する。

コルト回転式連発拳銃やシャープス・ライフル銃などの兵器の製造の過程で生み出された生産システムは、工廠（こうしょう）方式 (armory practice) と呼ばれる [4]。この生産システムは、当時必要とされた銃器の大量供給を可能にした点で重要な意味を持つ。この生産システムにおいては、ゲージの導入による品質の確保に加え、同時に工作機械の自動化がもつ意味が大きい。機械の自動化によって、安定した品質の製品をつくり出すための加工が可能になり、いわゆる互換式部品の製造が可能になったと考えられる。また、工廠方式では、工程順序に機械を配置したことも生産効率を高めた点で重要である。

工廠とは兵器や弾薬などの工場のことであるが、この方式に習ったミシンの生産システムも、工廠方式と考えることができる。この生産システムは 1) 互換式部品による製造、2) 専用機械による工程の自動化、3) 工程順の機械配置を特徴にすると考えることができる。

一方、これらの生産システムについて、製造計画に必要な情報の流れの観点から考察すると、いわゆる一箇所集中型の形態をとっていると考えることができる。この形式では物の流れ、すなわち工程順と情報の流れが同じ向きに流れることが特徴である。

このような観点から、このシステムの形態は模式的には図 2.3 に示すような形態にまとめることができる。

T 型車の組み立て製造ラインで知られるアメリカ合州国フォード社の生産システムは、高額な自動車を大量生産により安価に製造し、一般庶民に対する供給を可能にしたことで知られる。この

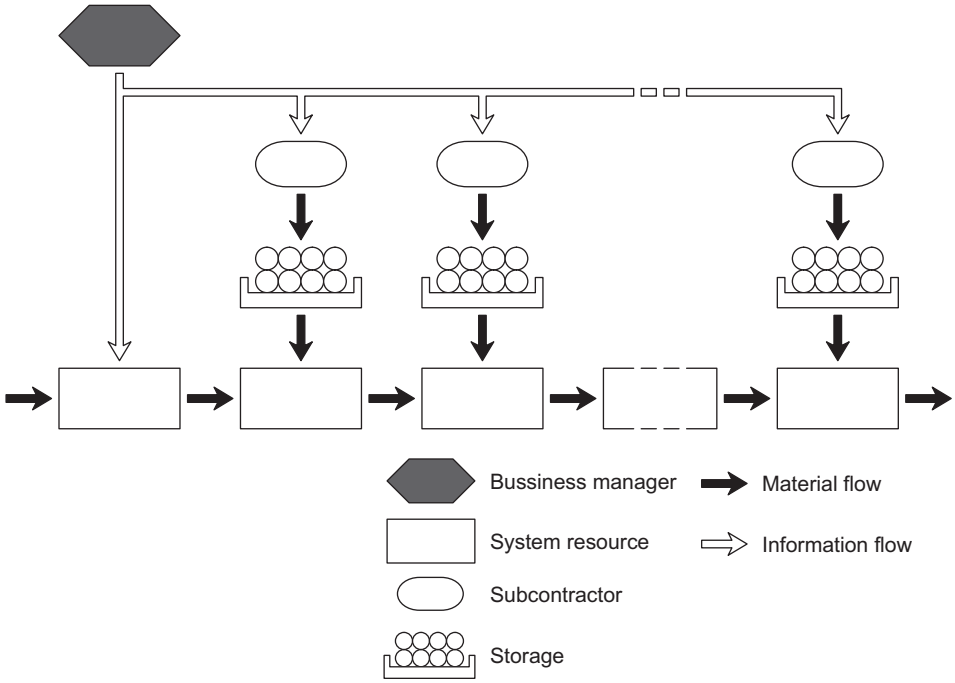


図 2.3: Ford style manufacturing system

システムは、それまで、作業者のもとで静止していたいわゆる静止式組立方式に対して移動式組立方式を導入した点に特徴がある。そのため、本研究では生産システムの形態としては、製品の流れに重点を置いた形態のシステムと分類することが可能であり、基本的には工廠方式と同一視することができる。

機械の自動化がもたらす恩恵を疑う者は、現在の世にはいないと考えられるが、自動化のために取られた方式、およびその意義は、時代とともに変っている。最初の自動化は、カムやリンクといった機械的な機構を利用したものであり、対象となる部品を加工するために必要な刃物と工作台の相対的な運動を産み出すものである。

機械の原価償却と製造量とのバランスが崩れると、一台の機械で様々な加工を行うことが望まれ、旋盤やフライス盤などのいわゆる汎用機をシーケンス制御によって稼働させる自動化の技術に進歩が見られる。直線的な運動や回転運動などの基本的な運動機能を工作機械に具備させ、ひとつの機械が単一の製品の加工を担うのではなく、汎用的な加工を行うことを可能にしたものである。さらに、部品の少量化や加工に要求される機械の運動精度への要求が高まると、情報処理技術の進歩と相まって数値制御による工作機械が誕生することになる。このような工作機械の場合には、単に作業者の技術を補助する役割だけではなくなり、人間では行うことができない複雑な操作、あるいは到達できない精度を可能にする意味合いを考慮に入れる必要がある。また、人件費の削減、熟練作業者に代る存在として、工作機械を捕える必要性も生じる。

なお、昨今では数値制御装置として、専用の情報処理装置ではなく、パーソナルコンピュータ (Personal Computer) などの汎用の情報処理装置を用いた工作機械が製造されている。より多岐に渡る処理を目的に行われるこの動きは、かって専用機から汎用機へと移り変わった経緯と重ね合わさられる。

ところで、FA(Factory Automation) は、システムの形態を指すものではなく、ここで整理した生産システムをより効率良いものするための技術と位置付けると理解しやすい。すなわち、工廠方式では機械機構を利用した製造工程の自動化が進められたが、これに数値制御 (NC: Numerical Control) の技術を採用し、さらなる製造の自動化を押し進めたものである。特にここでの情報処理技術の応用は、物の流れに重点をおいたものと考えられる。FA を言葉のとおり、工場内の作業の自動化と捕えると、以後整理をする他の生産システムの自動化に当てはめることも可能ではあるが、FA が提唱された時期等を考慮すると、ここに分類することが適当と思われる。

2.3.2　トヨタ式生産システム・SCM

フォード式生産システムと同様に自動車の組み立てラインに導入されたトヨタ式の生産システムは、在庫の削減を目標に考案された生産システムである [5]。この生産システムは、情報の流れが工廠方式で採られていたものと異なる点に特徴を有する。図 2.4 にトヨタ式生産システムを模式的に示す。

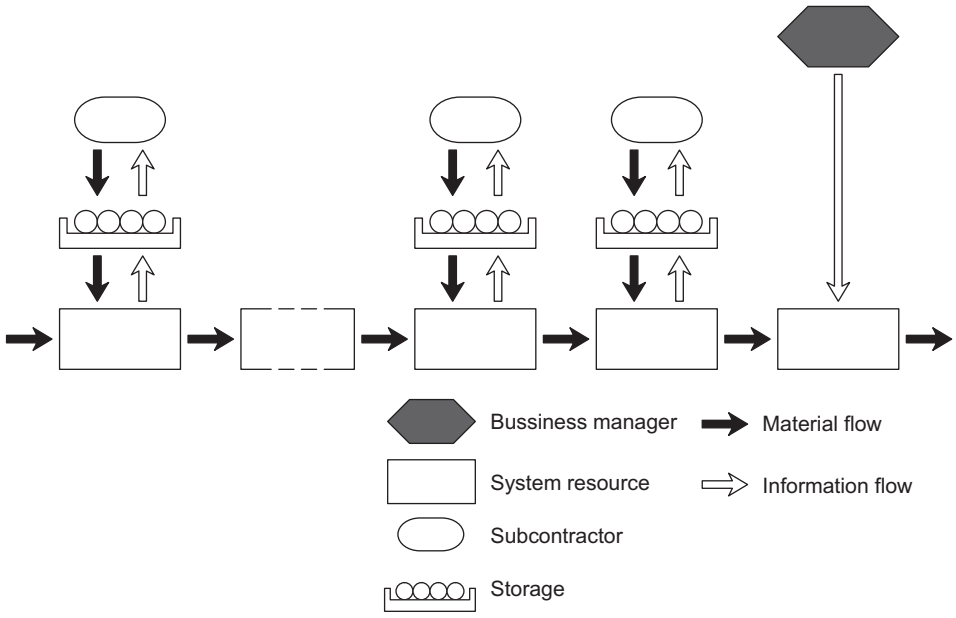


図 2.4: Toyota style manufacturing system

トヨタ式生産システムでは、最終製品の必要数や納期などの情報をシステムへの入力とし、各工程が必要とする部品を物的流れを遡る向きに伝えていく。そのため、物の流れと情報の流れの向きが異なる点に特徴がある。

トヨタ式の生産システムは、別名かんばん方式とも呼ばれることが多く、そのため発注にかんばんを用いさえすれば生産性が向上すると誤解されがちであるが、かんばんは、個々の装置間の情報交換の手段にすぎない。トヨタ式生産システムの主眼は、物の流れの停滞を最小限に押さえることであり、そのための手段として、情報の流れを見直した点に意義がある。物の流れの立場からは、工廠方式との区別をしにくい。それまでの生産形態をプッシュ型、トヨタ方式をプル型と呼んで区別する場合がある。対象となるのは物の流れであるが、物の流れは情報の流れに従い、物を押し出

す情報を前提とするか物を引き取る情報を流すかが両者の特徴になる。

なお、それまで一企業と関連企業から構成される生産システムを、問屋や消費者を含めたシステムにまで拡張した際に取り扱われる SCM(Supply Chain management) と呼ばれる経営手法が着目されている。この手法においては、POS(Point of Sale:販売情報管理システム) と呼ばれる仕組みが一定の成功を納めている。いわゆる消費情報を適切に伝達することで、望まれている箇所に望まれている製品を供給すると同時に、無駄のない生産を実現しようとする試みである。これは、かんばんに代わる手段としてインターネット (Internet) による情報ネットワークを利用したものと考えることができ、対象となる生産システムの形態はここで分類するものが適切であると考えられる。

2.3.3 分散型生産システム

情報網が発達し、消費者が市場にあるさまざまな製品を比較することが可能になると同時に、企業が消費者の望むものを知ることができるようになると、同じ製品を大量に製造する方式が通用しなくなる。企業は所有する生産設備を用いて、異なった機能を備えた製品を必要な量だけ製造しなくてはならなくなる。

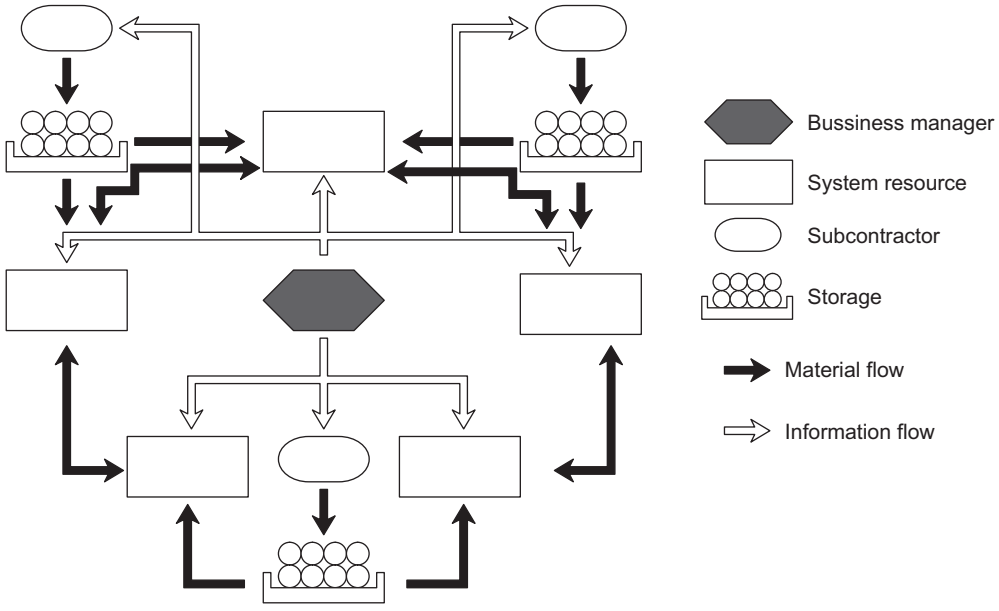


図 2.5: Distributed manufacturing system

このような生産においては、製品毎に機械の使用順序が同じであるとは仮定できない。そのため、図 2.5 のように、システムを模式化することが可能になる。この生産方式の特徴は、物の流れがもはや一方向ではないため、システム内のシステム要素が互いにちらばっている (distributed) という点にある。分散型の生産システムは、後述するように機器の制御の分野で考案されたシステムの形態を生産システムに導入したものである [6]。本来、大企業と呼ばれる企業の生産システムはもっぱら大量生産による生産形態をとるため、この形式を持つ組織はほとんどなく、その一方で企業の研究開発部品の加工を請け負ういわゆる中小企業には自ずとこの形態をとるものが従来

から多く存在する。

CIM(Computer Integrated Manufacturing) は、この形態のシステムに対して計算機 (computer) を利用した自動化と位置付けることができる。FA が物の流れに着目した自動化であるの対し CIM が情報の流れに着目した自動化と考えれば理解しやすい。取り扱う情報量が膨大になることが予想される大企業において、多品種少量生産を実現する上で問題となる情報処理方法を解決する手法として有望視されたものである。CIM も FA もどちらの技術もあらゆる形態の生産システムに対して、生産活動を支える汎用的な技術として捕えることができる。ただし、CIM は営業情報も含めたあらゆる情報を計算機によって統括しようとした動きであり、時代的な背景および対象となった生産システムを取り上げる場合には、ここでとりあげた分散型の生産システムと関連づけることが適していると考える。

なお、CIM を次節でまとめる自律分散型のシステムについて取り上げる文献が見られるが、自律分散的に情報が取り扱われるシステムと集中管理を前提とした CIM が用いられるシステムとは区別するべきである。このことは CIM の 6 階層モデルが、計算機の分散ネットワークで用いられる通信の 7 階層モデルを手本にしている [7, 8] ことからも理解できる。

2.3.4　自律分散型生産システム

自律分散の考え方は、制御の分野で新しい領域となりつつあった分散制御の問題点を解決するために提案された。森らは、分散制御と言えども、特別な集中管理下におかれたシステムであることを指摘し、自律的に振る舞うことが可能なシステム要素が分散的に配置された新しいシステム概念を提案した [6]。具体的にはシステムに要求される基本的な特性として 1) システムの無停止、2) オンライン状態での柔軟性、3) オンライン保守性の 3 つが重要であると指摘し、自律可制御性と自律可協調の性質をもつサブシステムからなるシステムを自律分散システムと定義している。

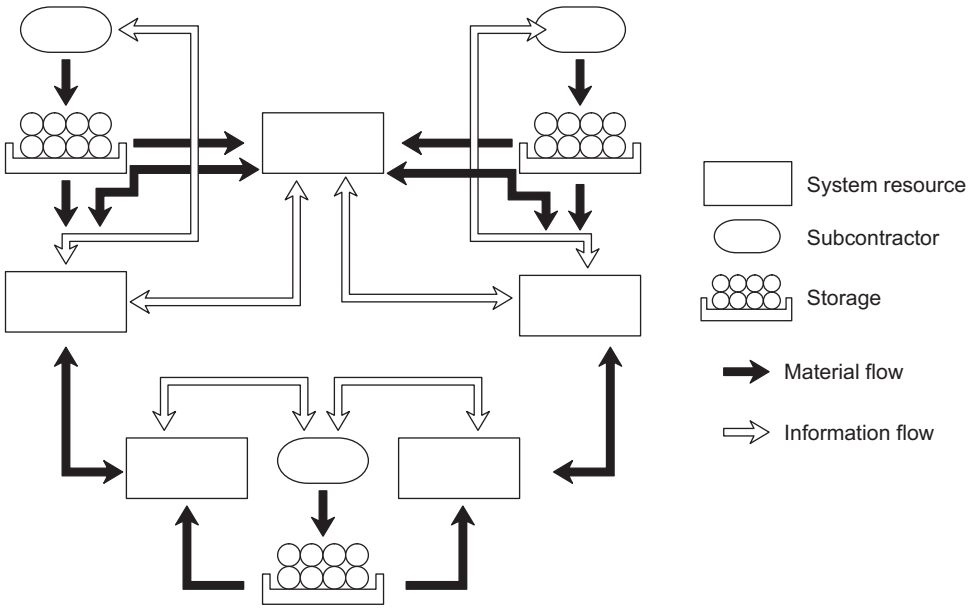


図 2.6: Autonomous decentralized manufacturing system

このような生産方式では、もはや中央に全体を管理するようなシステム要素は必要なくなる。そのかわり、個々のシステム要素には、状況に応じて振舞うために高度な情報処理機能が要求される。そのため、図 2.6 のように、システムを模式化することが可能になる。なお、この場合の分散という語に対しては、散らばっている (distribute) という表現より、分権の (decentralize) という語の方がふさわしい。

なお、自律分散の概念を提案した森らが指摘するように、自律分散の概念は生物からの類推 (analogy) に拠る。たとえば生物を構成する細胞は、どの組織の細胞をとっても均質と見なすことができ、それでいて目的に応じた異なった機能を備えた組織を構成することが可能である。さらに、冗長性があるために多少の細胞の破壊は全体の機能に影響を与えることがない。

生産システムの分野においても、システムの柔軟性や頑強性に対する要求は強く、生物のもつ特徴を取り入れた自律分散型の生産システムの概念 [9, 10] が提案されている。最近では、自律分散の概念に基づいた製品の組み立てラインなども開発されており、実際の生産現場での実施例もあげられる [11, 12]。

これらの自律分散システムに共通する特徴は、次のようにまとめることができる。

(1) システムを構成するシステム要素は均質あるいは機能的に平等である。
(2) システム内には十分な数のシステム要素があり、故障により機能を停止したシステム要素の代替となる要素が存在する。
(3) システム要素はシステム全体の状態ではなく、周囲の限定された状況から得られる情報に基づいて行動を決定する。

2.3.5 システム要素のもつシステムの性質

すでに述べたようにシステムは複数のシステム要素の結合から成る。そのため、システム要素の結合に着目することで、システムの特徴を考察することが可能である。本節では、システム要素の結合について、物の流れと情報の流れ、言い替えれば、物理的流れと論理的な流れに着目し、すでに実用化されているシステムおよび提案されているシステムについて整理した。ここで再びシステムとシステム要素について考察する。

前節で指摘したように、システムはシステム要素としての側面を持つ。またシステム要素は、これ以上分解できないものとして扱われる場合が多いが、実際には分解できると考えた方が妥当である。その場合には、システム要素は、システムとしての側面を持つことになる。

実際のところ、本章で取り扱った生産システムは、一般に大企業からの立場から生産システムを考察したものであり、下請け会社のような組織はこのシステムのシステム要素のひとつとしてしか取り扱われていない。このようなシステムとシステム要素に対する認識は、潜在的には理解されていても明確に区別して取り扱われることはほとんどない。次節からは、最初にこのことを指摘したホロンの概念に触れ、著者が提案するホロニック生産システムの導入を行なう。

2.4 ホロニック生産システム

本節の目的は、ハンガリーの思想家 A. ケストラーが提案したホロン [13, 14] の考え方に基づいたホロニック生産システムの概念を再提案することである。提案する概念は、生産システムが有する複雑な構造の一面を適切に捉えており、現存する生産システムの問題点の改善や次世代の生産シ

ステムの構築を行う上で有益な指針を与えるものである。

ホロニック生産システムは、1980 年代後半に未来工場システム (FFS:Future Factory System) を実現するための方法論として報告されている [15]。しかし著者が認識する限り、そこで提案されているホロニック生産システムの方法論は自律したシステム要素の在り方に関するものであり、同時期に森らが提案している自律分散概念 [6, 16] との違いが明らかではない。このことは現在のホロニック生産システムが、自律分散型の生産システムの 1 形態あるいは別名として取り扱われていることからも推し量ることができる。

しかし元来ホロンの概念は、自律分散の概念とは異なった観点から論じられており、どちらかと言えば自律分散の概念を包括するものである。さらには、自律分散システムが持つ問題点を解決する可能性を持っている。

本節ではホロンの概念に基づいた新しいホロニック生産システムの概念を提案し、ホロンの特徴を適切に表現するモデルの導入を行う。

2.4.1　ホロンとホラーキィ

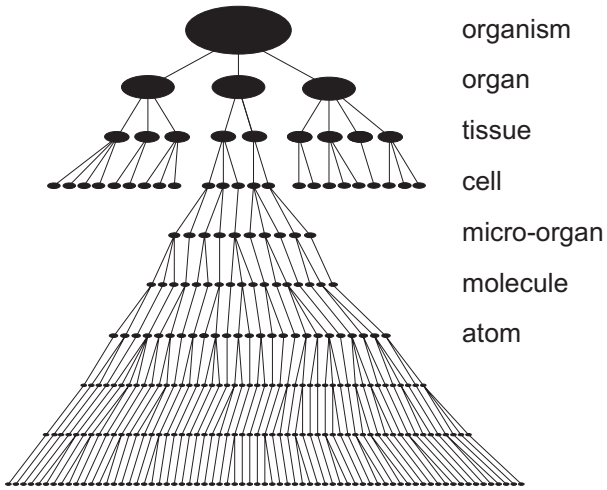
A. ケストラーは、1967 年にホロン (holon) の概念を提案した [13, 14]。彼はすべての事象を単一なレベルの基本的な要素に還元して説明しようという立場をとる還元主義を批判した。彼の思想は、さまざまな分野の研究者によって支持され、最近では複雑系の立場をとる研究者にも影響を与えていると言われている [17]。

A. ケストラーは、システムを基本的な要素に還元することはできないと主張した。すなわち我々が観測できる事象はすべて、システム要素としての部分と、システムとしての全体の両方の特質を備えていると説き、これをホロンと名付けた。ホロンとは、ギリシャ語で全体を意味する holos と部分を意味する接尾語の-on からなる造語である。図 2.7(a) は、生物というシステムの構造を示している。この図に示されるように、生物という全体は、器官と呼ばれる部分から構成されているが、器官は組織という部分に対しては全体として認識される。我々はこのようなシステムの階層構造の節を観察しているにすぎす、ホロンとは階層構造の節と定義することができる。A. ケストラーは、ホロンの階層からなる構造をホラーキィ(holarchy) と呼び、システムの階層構造の重要性も指摘している。すなわちシステムは階層構造を有するが故に安定とした。

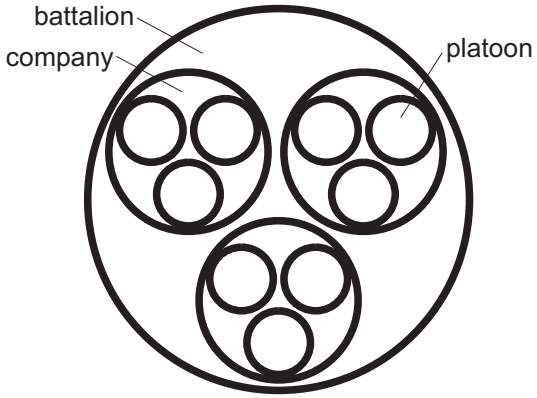
図 2.7(b) は、軍隊の組織を表現している。中隊は大隊を構成する部分として位置づけられると同時に、小隊からなる全体として認識されることを表現したものであり、図 2.7(a) とは異なる視点からホラーキィを表現している。

この図に示されるように、ホラーキィとは単なる機能の異なるシステム要素の上下関係を意味するものではなく、上位のシステムと下位のシステム要素の構造上の関係を示すものである。すなわち、下位のシステムと上位のシステムを切り離して取り扱うことはできず、下位のシステム要素群の行動が、結果として上位のシステム要素の行動になる。

森らは独立したシステム要素の上下関係からなるシステムをさして、階層的な分散構造 [6] の問題点を指摘している。すなわち上位のシステム要素と下位のシステム要素は分離可能な個別のシステム要素であり、上位のシステム要素が下位のシステム要素の行動を決定するシステムについて問題点をあげている。同じ階層構造という語によって表現されるが、ホロンによる階層構造は、このようなトップダウン的な意思決定を行う階層型システムとは異なる。



(a) Holon and holarchy of organism



(b) Holon and holarchy of army

図 2.7: Holon and holarchy (A. Koestler)(1)(2)

2.4.2 従来のホロンの解釈

自律分散の概念の提案と同時期に、ホロンの思想は内閣総理大臣諮問機関のひとつである「科学技術の史的展開」のグループによってわが国に紹介された [18, 19, 20]。ホロンに全体子という訳語を充てたのも、ホロンの思想に基づいているという意味でホロニック (holonic) という語を造り出したのもこの研究グループによるものである。

この時の議論は、個性の尊重と全体の調和という観点でまとめることができる。すなわち、全体の効率をあげるためには、個がもつ特質をどのように活用すれば良いか、あるいはどのような場を設ければ個の利点を伸ばすことができるかについて議論が行われている。しかし、部分である個人によって形成される企業という全体が、社会という全体の中でどのような個として振る舞えば良いかということは示されていない。

このような背景の下で、ホロニック生産システムの検討が行われている [15]。ここでは、CIM(Computer Integrated Manufacturing) が目指したコンピュータによる生産システムの統括の別の形態として、

ホロニックインテグレーションと呼ぶ自律した要素による生産システムの統括を試みている。しかし、A. ケストラーが指摘した部分であり全体であるという位置づけではホロンは取り扱われていない。むしろ同時期に提案された自律分散の観点から論じられており、自律分散の概念と同一視される原因のひとつとなる。

2.4.3　自律分散型生産システムの問題点

自律分散の概念においては、同一場での均質性と冗長性がシステムの柔軟性と頑強性の前提条件である。複数の計算機から構成される情報ネットワークは、これらの条件を満たす代表的なシステムである。すなわち情報ネットワークは論理的なひとつの場を形成しており、システム要素である計算機が能力的には異なるが機能的には同じであり、また冗長性をもっている。

一方、生産システムは、機能の点からも能力の点からも異なる複数の生産設備から構成される。このようなシステムにおいては、同一場における均質性を前提とすることはできない。また製造費はシステムを運営する上でのもっとも重要な条件のひとつであることからも、設備の冗長性を前提とすることは現実的ではない。

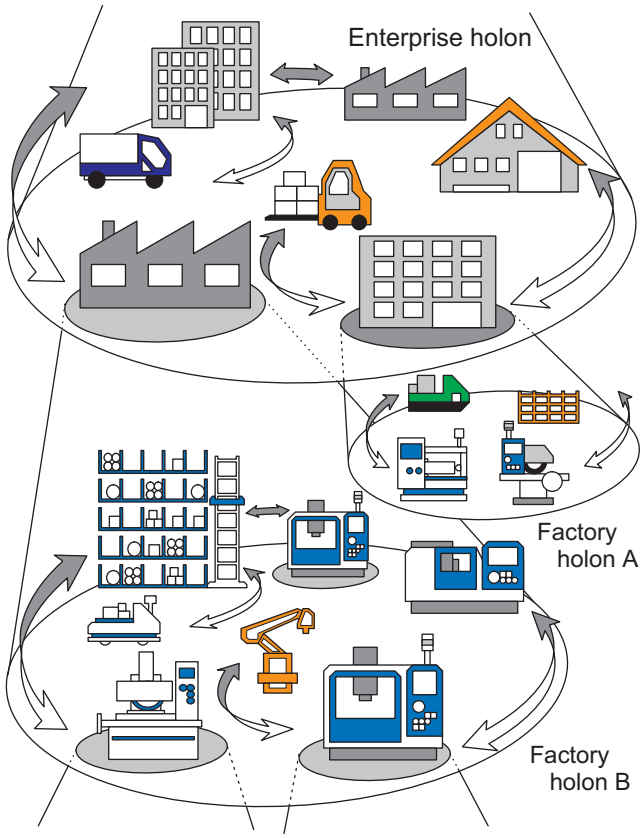


図 2.8: Structure of holonic manufacturing system proposed

ホロンの思想に従えば、自律分散の概念では部分と全体を明確に区別している点にも問題点がある。すなわち、生産システムである工場や製造ラインを全体とし、これらのシステムとしての柔

軟性や頑強性を実現するために、構成要素である生産設備を部分として取り扱っている。生産システムの場合、図 2.8 に模式的に示すように、工場は企業や社会というより大きなシステムを構成する部分であることは疑いようもなく、自律分散概念のように平坦な均一場を対象としているシステムモデルでは、取り扱うことができる問題におのずと限界がある。

2.5 ホロニック生産システム概念

2.5.1 生産システムのホラーキィ

生産システムに見られる組織間の包含関係に着目して、一般的な生産システムのホラーキィを整理した結果を図 2.9 に示す。

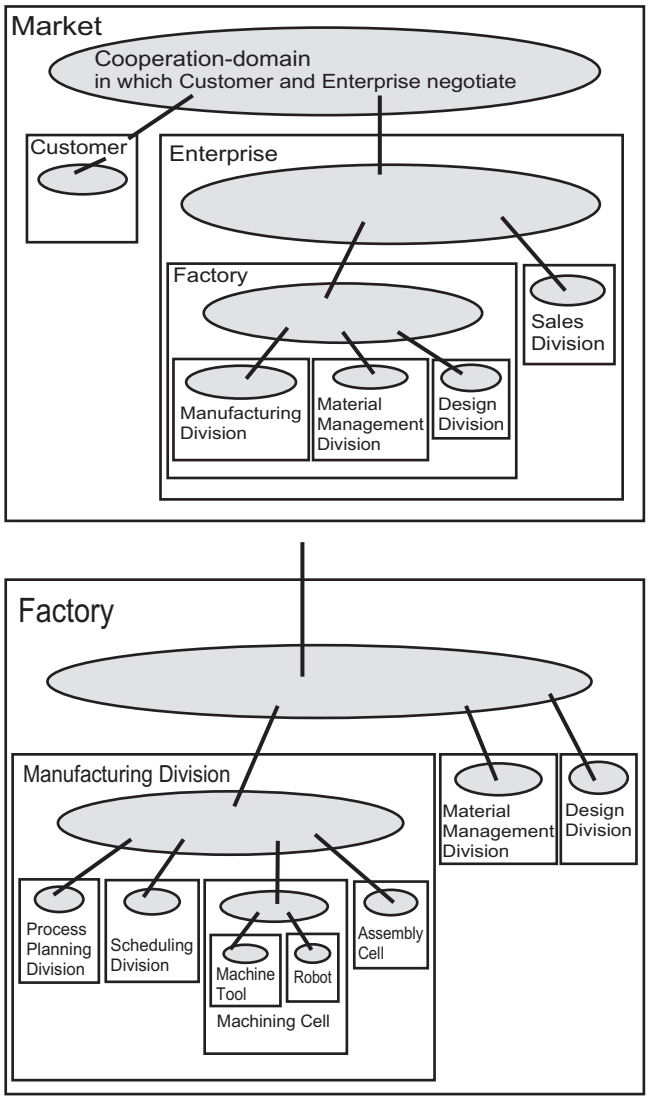


図 2.9: Example of hierarchy of manufacturing system

たとえば、市場と呼ばれる社会システムは、顧客 (customer) と企業 (enterprise) などのシステム要素から成り、これらのシステム要素の相互作用によってシステムの運用が行われている。また企業の活動とは工場 (factory) と営業部門 (sales division) の相互作用に他ならない。また顧客は、要求やクレームを企業に対して行うのであって、直接工場や営業部門と交渉を行うことがないことも特筆すべき点である。同様に工場と呼ばれるシステムもより下位の製造部門、資材部、設計部門などのシステム要素に分解される。またそれぞれ部門をシステムとみなした場合には、さらに下位のシステム要素の存在を考えることができる。

本論文では、機械、搬送機そしてロボットなどの生産設備だけでなく、セルやショップや工場などの集合体を 1 つのシステム要素として取り扱い、さらに上位のシステムを構築するするためのシステムモデルの提案を行う。

2.5.2　ホロンのモデル化

A. ケストラーは、システムの階層構造の節をすべてホロンと呼んでいる。本論文では、後述する自律性と協調性を有するシステム要素だけをホロンとして定義する。言い換えればホロンは、外部で生じた変化を内部に取り入れ、また内部で処理した結果に基づき外部に能動的に働きかける要素として認識される。このような性質を持つホロンを表現するために 2 本の双方向の矢印を用いて図 2.10(a) のように表現する。また内部には情報処理のための場を有し、これを協調場 (cooperation domain) と呼び楕円を用いて表現する。また、四角枠を用いてシステムの境界を表す。

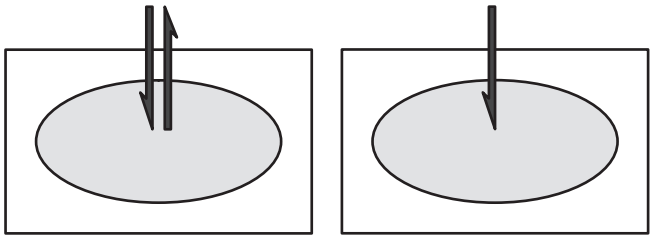


図 2.10: Holon and non-holon

一方システム内には、ホロンではないシステム要素も存在する。このようなシステム要素を非(ノン)ホロン (non-holon) と呼び、外部からの指示に従うだけの要素として位置づけ、図 2.10(b) に示すように内側に向かう矢印を用いて表現する。非ホロンも協調場と境界を有する点ではホロンと同じである。

ホロンおよび非ホロンのモデルを用いることで、包含関係に基づいたホロンの階層構造であるホラーキィ (holarchy) は、図 2.11 のように表現される。この図は、図 2.7 に示したホラーキィの異なる 2 つの表現を結合した形式になっている。この図から理解できるように、ホロンは階層の節に相当する楕円に対して働きかけ、ホロンおよび非ホロンはこの場から影響を受ける。このことが節を協調場と呼ぶ理由である。またホロンの表現に用いた四角の枠は、ホラーキィの図からシステムとしての境界を意味することが理解できる。

このようなシステム要素間の包含関係を前提としたシステムの場合、システムとシステム要素、あるいはシステム要素とシステムの関係は、次のように記述することが可能である。

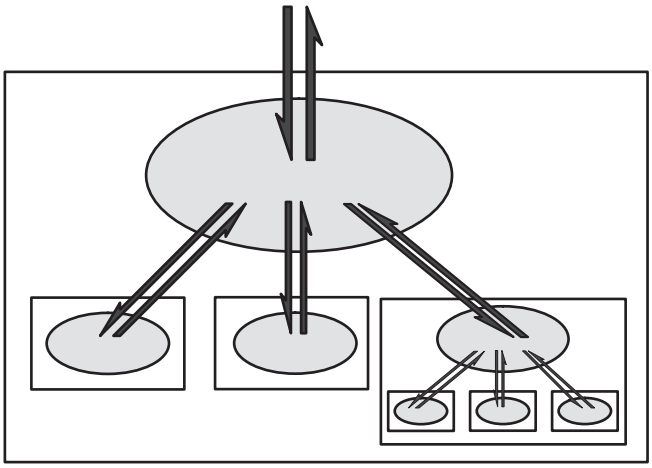


図 2.11: holarchy

ただし、本論文で特徴とするシステムとシステム要素の包含関係は、$\oplus$ および $\ominus$ の記号を用いて表現し、それぞれの記号の持つ意味は以下のとおりとする。

h_i　i 番目のホロン
$h^{\oplus}$　ホロン h が構成する上位のホロン
$h^{\ominus}$　ホロン h を構成する下位のホロン

ホロンはそれを構成する下位のホロンの集合として定義される。すなわち、

$$h = \{h_i^{\ominus} | 1 \leq i \leq n\} \tag{2.1}$$

ここで、n はホロン h を構成する下位のホロンの数である。
一方、ホロン h は上位のホロン $h^{\oplus}$ を構成する要素である。したがって、以下の関係が成立する。

$$h \in h^{\oplus} \tag{2.2}$$

2.5.3 自律と協調

ホロンは下位のシステム要素であるホロンによって構成されている。このことから、ホロンの基本的な性質と定める自律と協調の関係を導くことが可能になる。すなわち、1 つのホロンが自律しているということは、それを構成するホロン群が協調していることを意味する。従って自律と協調は、ひとつの定義文の主語を置き換え、以下のように定義する。

自律 外部から与えられた仕事を達成するための行動計画を**自ら**立て、かつ**自ら**状態を監視しつつ作業を遂行し、異常状態が生じた場合には**自ら**必要な措置をとること。

協調 外部から与えられた仕事を達成するための行動計画を**複数のシステム要素間で**立て、かつ**複数のシステム要素間で**状態を監視しつつ作業を遂行し、異常状態が生じた場合には**複数のシステム要素間で**必要な措置をとること。

前節で用いた記号を利用し、自律と協調の関係を表すと次のようになる。ここで、ホロン h がタスク t を与えられたときの自律的な行為および協調的な行為をそれぞれ次のように表現する。

$A_h(t)$ ：ホロン h のタスク t に対する自律的行為
$C_h(t)$ ：ホロン h のタスク t に対する協調的行為

ホロンの自律的な行為はそれを構成する下位のホロンの協調的な行為の集合として定義される。このとき、上位のホロンに与えられたタスクは、そのホロンを構成する下位のホロン群に与えられるタスクと等しいとする。すなわち、

$$A_h(t) = \{C_{h_i^{\ominus}}(t) | 1 \leq i \leq n\}. \tag{2.3}$$

ここで、n はホロン h を構成する下位のホロンの数である。

一方、ホロン h の協調的な行為は上位のホロン $h^{\oplus}$ の自律的行為の一部を担う。したがって、以下の関係が成立する。

$$C_h(t) \in A_{h^{\oplus}}(t) \tag{2.4}$$

ここで定義した自律と協調の関係に関しては、他のシステム概念において、自律を自らの状態を最適にするための行為とし、協調を他のシステムの最適化のために自らの行動を抑制することと定義する点とは明らかに異なる。

ところで本論文では、ホロンを自律と協調を持つ要素と定義している。階層構造から導いた自律と協調の意味から逆にホロンを定義することにより、複数のホロンによるシステムに包含関係を前提とした階層的な構造を持たせるためである。

2.5.4　ホロンと非(ノン)ホロン

前述の議論に基づき改めてホロンと非(ノン)ホロンを以下のように定義する。

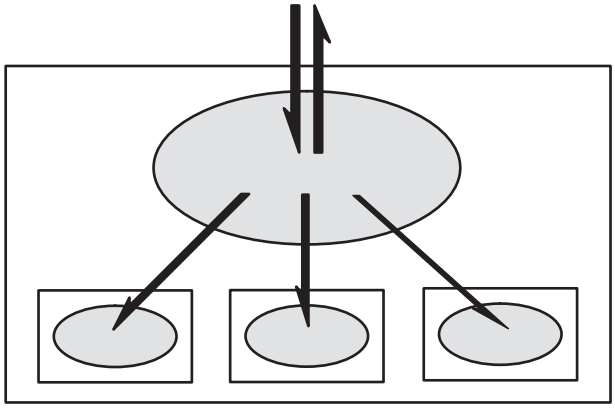
ホロン　自律性と協調性を有するシステム要素
非(ノン)ホロン　ホロン以外のシステム要素

また、ホロニック生産システムを以下のように定義する。

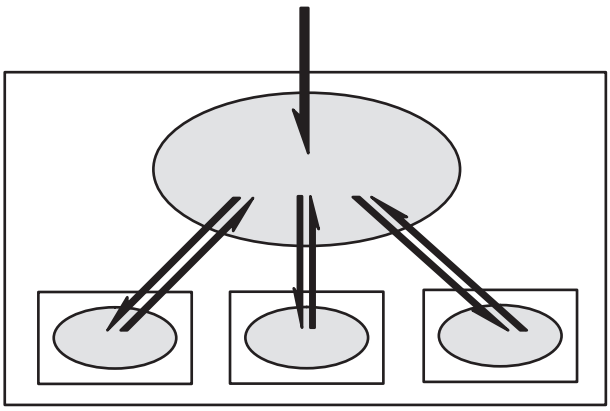
ホロニック生産システム　ホロンと非(ノン)ホロンから構成される生産システム

提案する概念の特徴として、非ホロンの存在が上げられる。ホロンは非ホロンから構成されることが可能である。すなわち、自律性あるいは協調性を持たず、定められた動作を定められた条件下で行う要素が複数個集まった時に、自律と見なせる行動を行い、さらにそのシステム要素が上位のシステム要素の自律のための協調動作をとることができる場合、非ホロン群によるホロンが構築されることになる。図 2.12(a) は、この様子を模式的に示している。

一方、ホロンの集合が、ホロンを構成するとは限らない。ホロンは協調性を有するシステム要素であるため、その集合からなるシステム要素は自律性を有することが保証される。しかし、構成されたシステム要素が協調性を持たなければ、すなわちさらに上位のシステムのために協調的に振



(a) Holon including non-holons



(b)Non-holon composed of holons

図 2.12: Relationship between holon and non-holon

る舞うことができなければ、ホロンとして認識することはできない。この様子は、図 2.12(b) に模式的に示される。

同様の理由からホロンと非ホロンが同一場に存在することも想定できる。このように、著者らが提案するホロニック生産システムは、ホロンだけでなく非ホロンの存在も前提にシステムの構成を考えている。現存する生産システムが非ホロンの階層構造からなるシステムとすれば、ホロニック生産システムは、必要な箇所をホロンに置き換えた生産システムということができる。

2.5.5 自己相似性と隠蔽性

ホロンとホラーキィのモデルから理解できるように、ホロンおよび非ホロンは自己相似的な構造を有する。言い換えればホロンおよび非ホロンは、構造上はあらゆる階層において均質であるということを意味する。さらに全ての階層において行われる行為に関しても自己相似的な角度から捕らえることができる。システム要素の均質性は、自律分散システムと同様に、システム要素の振る舞いを検討する上で極めて重要な意味を持つ。

一方、システム要素の自律は、そのシステム要素を構成するさらに下位のシステム要素群の協調動作によって実現される。個々のシステム要素が協調的に振る舞っている状態では、外部から内部

状態の制御を必要とせず、内部の隠蔽が可能になる。隠蔽性もシステム要素を構築する上で重要な意味を持つ。

2.5.6　頑強性と柔軟性

システムに包含関係に基づいた階層構造を持たせることにより、ホロニック生産システムは、極めて多くのシステム要素を持つことが可能になる。一般にシステム要素の数が多くなると、システムの内部には稼働率の比較的低い要素が生じる。このようなシステム要素を利用して、システムに求められる機能が変更された場合や、システム要素の故障時には、ホラーキィの再構築を行うことが考えられる。すなわちホロニック生産システムにおいては、システム要素の冗長性を同一境界内に求めずに、他のホロンを構成するシステム要素に求めることで、システムの頑強性や柔軟性を確保する。

2.6　結言

本章では、システムとシステム要素の関係について考察し、システムとシステム要素を区別して取り扱うことの問題点について指摘した。また代表的な生産システムを、物の流れと情報の流れに基づいて考察を加えた。

考察に基づいて、新しい生産システムの形態について提案した。提案する生産システムは、基本的に A. ケストラーのホロンの概念に従うものであるが、システム要素の自律性と協調性の点から拡張し、新しいホロニック生産システムの概念を提案した [21]。

提案する新しい生産システムの特徴は以下のように要約される。

(1) ホロンの概念に基づき、自律と協調の定義を行った。自律と協調は互いに補完の関係になるように定義され、この定義によりシステムの包含関係に基づく階層構造が陰に表現されている。

(2) 自律性と協調性を有するシステム要素をホロンと定義する。またホロン以外のシステム要素を非(ノン)ホロンと定義する。ホロンと非ホロンは、同一場に共存することが可能であり、またどちらも上位のホロンあるいは非ホロンを構築することが可能である。

(3) ホロンからなるホロニック生産システムは、システム構造に自己相似性を有し、構造の自己相似的な側面に着目した統一的な処理を規定することが可能である。任意の階層に所属するホロンが、この規定に基づいて振る舞うことで、異なる機能のシステム要素から構成される複雑なシステムの動作が、適切に維持されることが保証される。

参考文献

[1] 杉田忠彰, 上田完次, 稲村豊四郎, 基礎切削加工学, 第 8 章 切削加工のシステムとその評価, 共立出版株式会社, 1984

[2] Oyvind Bjorke, Manufacturing systems theory - A geometric approach to connection -, Tapir publishers, 1995

[3] M. Eugene Merchant, Progress and Problems in the Application of New Optimization Technology in Manufacturing, 1967

[4] David A. Hounshell, (訳:和田一夫他), アメリカンシステムから大量生産へ 1800-1932, 名古屋大学出版会,1998

[5] 門田安弘, 新トヨタシステム, 講談社, 1991

[6] 森欣司, 宮本捷二, 井原廣一, 自律分散概念の提案, 電気学会論文誌 C, Vol.104, No.12, pp.303-311, 1984.

[7] Reference Model for Shop Floor Production Standards Part 1 & Part2, ISO Technical Report 10314, 1990

[8] 吉川弘之, 木村文彦, 設計と CAD, 朝倉書店, 1993

[9] 沖野教郎, 生物型生産システム, 朝倉書店,1993.

[10] 上田完次, 生物指向型生産システム, 工業調査会,1994.

[11] Mineo Hanai, et.al, New Autonomous Manufacturing System Adapted for Uncertainty in Market,Proceedings of the Second International Workshop on Intelligent Manufacturing Systems 1999, pp.15-22, 1999.

[12] 花井嶺郎ほか, 市場の不確実性に順応する生産システム (APS) の開発, 精密工学会誌, Vol. 65. No.8,1087-1091, 1999

[13] A. ケストラー, 機械の中の幽霊, ぺりかん社,1969.

[14] A. ケストラー, ホロン革命, 工作舎,1983.

[15] 古川勇二ほか, フューチャ・ファクトリシステム (FFS) 調査委員会, FFS に関する調査研究報告書第 IV 報, 日本電子工業振興協会,1988

[16] 湯浅秀男, 伊藤正美, 自律分散システムの構造理論, 計測自動制御学会論文集, Vol.25,No.12, pp93-100,1989

[17] M. ミッチェル・ワールドロップ, 複雑系, 新潮社, 1996.

[18] 石井威望, ホロニックパス, 講談社,1985.

[19] 村上新八, ホロニック・マネジメント, 日本能率協会,1984

[20] 北矢行男, ホロニックカンパニー,TBS ブリタニカ,1985.

[21] 樋野励, 森脇俊道, ホロニック生産システム概念の提案, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.67, No. 658, 2001

第3章　システムとしての工作機械

3.1　緒言

工作機械 (machine tool) は、生産システムを構成する中心的な役割を果たすシステム要素のひとつとして認識することができる。すなわち、生産システムの機能を実現するための役割の分担を行い、また相互に連携を取るために物理的あるいは論理的に結合されているものを考えるとき、その代表的なものとして工作機械をあげることができる。工作機械の他にも、ロボット (robot)、自動搬送車 (AGV: Automated Guided Vehicle) そして自動倉庫 (automated warehouse) などの生産設備も同様な理由から生産システムを構成する重要な生産設備として考えられる。

工作機械のように数値制御装置 (Numerical controller) に代表される情報処理装置を備えた生産設備の場合、工作機械内部において加工の他に、工具管理やスケジュールなどのさまざまな処理が行われている。すなわち工作機械の機能を実現するために、さまざまな処理の役割がいくつかの部品 (あるいは装置) によって分担され、またそれらが物理的あるいは論理的に結合された結果、工作機械が構築されていると考えることが可能である。そのため工作機械はシステムを構築するシステム要素と考えると同時に、工作機械は多数のシステム要素から成るシステムとみることができる。

特に、従来の工作機械に対して、より高い機能を備えた工作機械を開発する場合には、工作機械を単なるシステム要素として扱うことは適切ではなく、システムとしての取り扱いが必要になると考えられる。

本章では、工作機械をシステムとして捕え、工作機械の機能についての分析と個々のシステム要素間の関係について考察する。この検討結果に基づき、より高度な機械加工システムを構築するためにその論理的な構造と情報処理方法についての検討を行う。また、次世代の工作機械を構築するために、情報処理と動作補償のそれぞれの観点から試みた検討結果をまとめる。

3.2　工作機械の構成

本研究で取り扱う工作機械は、基本的に数値制御装置を備えたものを対象とし、情報処理による状況判断と加工のための動作制御が可能なものを取り扱う。このような工作機械の構成要素の関係は極めて複雑であると考えられ、工作機械を生産システムを構成する要素として捕えるのではなく、工作機械をひとつの機械加工システムと考えて、各構成要素の関係を吟味する必要があると考えられる。

ところで、生産システム内には、工作機械やロボットなどの生産設備の他に、優れた情報処理能力を備えた作業者と呼ばれるシステム要素が存在するが、この作業者の役割を無視することは一般にはできない。ただし、本研究では、加工を行うために必要な作業者としての機能は、システム要素としての工作機械が備えていることを最終的な形態として議論を進める[注 1]

[注 1] あるいは、ここで扱う工作機械は、本来の加工を行う生産設備として取り扱われる意味での工作機械と、情報処理

本節では、これまでの議論に従って、他の生産設備との結合形式として、情報を介して結合される論理的な結合と、材料や加工品のような物を介して結合される物理的な結合によって整理する。

3.2.1　工作機械内部における物の流れと情報の流れ

工作機械を構成する要素は、大きくは工具、加工テーブル、駆動モータ (駆動アクチュエータ) などの機械要素と演算処理部や記録媒体などの情報処理要素に大別することができる。また、加工中には、潤滑油や被削材などの要素も、工作機械を構成する要素として捕えることができる。

また、工作機械は，生産活動を通じて様々な種類の情報を取り扱っている．ここでは，生産活動の時間軸にそって，加工前の工程 (pre-process)，加工中の工程 (in-process)，加工後の工程 (post-process) の 3 つの区分に分けて工作機械の情報処理に関する検討を行う．これら 3 つの区分は，以下のように要約される．なお、加工間の工程をこれらの 3 つの区分とは別に考えることができるが、ここでは、ひとつの加工工程を中心に分類をしているため、加工間の工程のうち加工前あるいは加工後に行われるものは独立した別の工程とし、ひとつの加工中の一時的な中断の間に行われる処理は、加工中の処理として扱う。

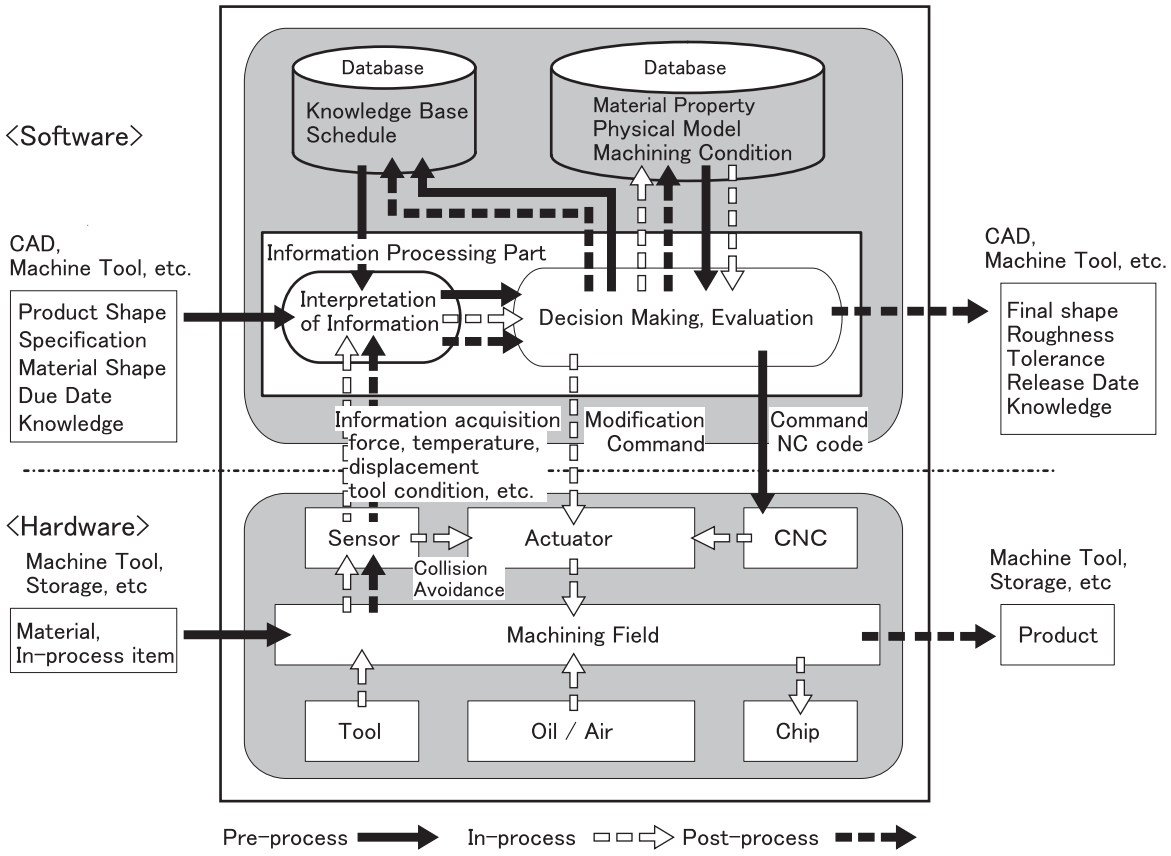


図 3.1: Logical structure of machine tool

の役割を果たす作業者から成るシステムと考えてれば、ここでの議論の一般性は失われない。

加工前の工程： 加工を行う際に前提条件として与えられる情報を取り扱う工程がこれに当たる。ここで取り扱われる情報は，外部から与えられる情報と，内部で新たに生成される情報とに大別される．工作機械の外部から与えられる情報としては，製品形状や素材形状，および加工精度などに関する情報があげられる．一方，内部で新たに生成される情報としては，工作機械の動作を制御するための手順を記述した NC プログラムなどがあげられる．

加工中の工程： 加工中に行われる加工処理および情報処理が対象となる．加工中の機械の動作は，基本的には加工前の工程で定められた動作計画に従って行われる．しかし，工具の欠損などの異常に対する処理や，工作機械本体の熱変形による加工誤差に対する補正動作は，加工中に行われなければならない．これらの動作に関する計画は，加工状態の監視のために取りつけられたセンサからの情報を用いて，工作機械が内部に所有している物理モデルや経験式を用いて処理することによって実現される．学習として位置づけられるデータベースの更新の一部は，この工程中に行われる．また，工具交換などのために生じる無駄時間を利用して行われる加工間の工程 (between process) も，この加工中の工程に含まれるものとする．

加工後の工程： 加工結果に対する評価などの情報処理や，機械の性能維持のために行う検査などは加工後の工程に分類される．ここでの情報処理には，機械が備えているセンサや情報処理装置だけでなく，専用の検査装置によって行われる場合もあり得る．ここで得られた情報は，加工前に行われる動作計画の際に知識として用いられるほか，他の工作機械などの設備にも提供されることが考えられる．

以上の分析結果に従って整理することにより、工作機械の基本的な構造は図 3.1 に模式的に示すことができる。この図から、工作機械の外部から与えられる情報あるいは外部に与える情報は、他の工作機械あるいは生産設備と交換される情報に他ならないことが理解できる。この情報は、工作機械というシステム要素を他のシステム要素と論理的に結合させる働きを担っている。一方、工作機械内部で取り扱われる情報は、工作機械の構成要素間で交換される情報であり、この情報により各要素は論理的に結合し、工作機械というシステムを形成することになる。

なお、被削材や製品 (あるいは半加工品) から生じる物の流れは、基本的には一方向である。また、一般的な工作機械に限定すれば、中央の演算装置によって各要素の動作は集中的に管理されている。そのため、ここで分類した工作機械のシステムとしての形態は、第 2 章で分類した工廠方式と同様の生産システムの形式に対応する。

ところで、工作機械を構成する部品をモジュール化し、それらを組み合わせることで、目的の機能をもった工作機械を構築する試みが一部の研究者によって行われている。この場合にも中央処理装置を前提にした工作機械の形態を想定することが可能である。また、個々のモジュールに何らかの情報処理装置を搭載し、情報処理を個々のモジュールに分担させることで分散型、あるいは自律分散型の形態を想定することも可能である。ただし、この形態の工作機械については、本章の枠を越えるためこれ以上の議論は行わない。

機械が行った処理の内容をさらに抽象化して整理したものを図 3.2 に示す。すなわち、図 3.1 で整理した情報の流れは、基本的には、図 3.2 した 3 つの動作から構成されると考えている。この動作とは、(1) 情報の取得、(2) 行動内容の決定、(3) 行動内容の実行の 3 つである。

情報の取得は、機械が能動的に獲得するものと受動的に獲得するものの 2 種類に大別することができる。能動的に獲得するものは、工作機械が備えているセンサや通信機能を用いて獲得する情報を意味し、加工中に検出される切削力や温度分布などの情報や、他の工作機械などがデータ

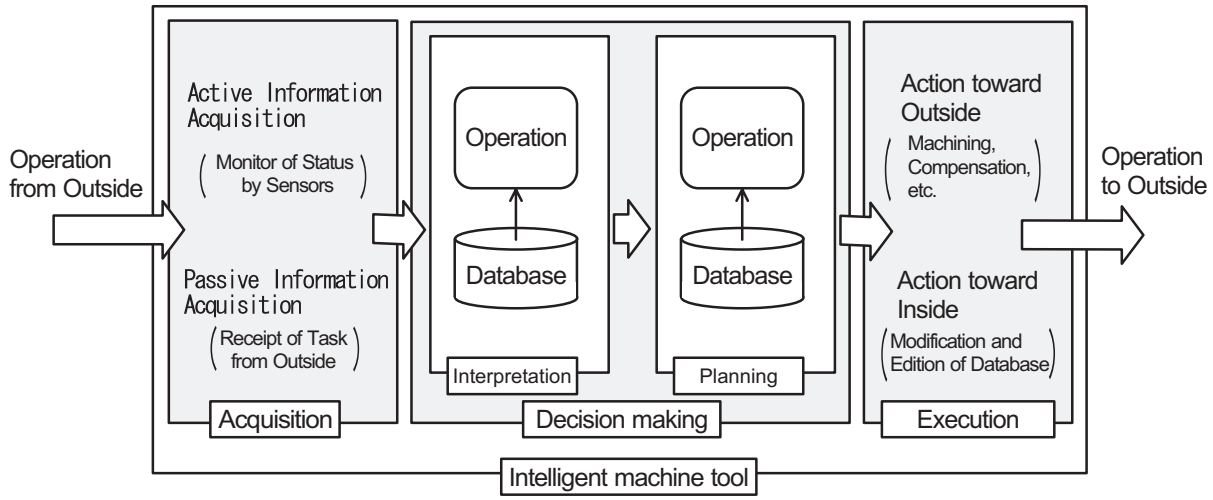


図 3.2: Fundamental information flow

ベースとして記憶している加工条件に関する情報などが対象となる。一方、受動的に獲得する情報としては、タスクとして与えられる製品や材料の形状や要求精度に関する情報である。行動内容の決定は、さらに 2 つの段階に分けて考えることができる。すなわち、情報の解釈と行動の立案である。いずれも情報の処理に関するものであり、ソフトウェア的な処理からなる。いずれの処理も演算部とその際に利用するデータベースから構成される点では同じであるが、ここでは区別して扱う。行動内容の実行は、計画にしたがって実際に行う行動を意味する。ここではさらに、工作機械を取り巻く外部に対して影響を与えるものと、工作機械内部の状態に対して影響を与えるものとを区別して取り扱う。前者の例としては、工作機械の主目的である機械加工の他にスケジュールの変更などがあげられる。さらに所有している工具や加工知識の提供などもこれに含まれる。後者の例としては、工作機械が備えているデータベースへの更新などの行為があげられる。この場合、他の工作機械や設備はこの行動の影響を受けない点で前者と区別する。特に、この行為は機械が行う学習であると言うことができ、本研究で扱う工作機械を特徴づける上でも重要である。

このようなアプローチは、「機能分解に基づくアプローチ」と呼ばれる。動作計画の最中に前提条件が変動すると、立案した計画は目的の機能を果たすことができなくなることが指定されている。しかし、本研究では、自らの計画が環境に与える影響も含めて、前提条件を再考した計画の立案と動作を繰り返すことにより問題に対処することを考えている。

3.2.2　工作機械の論理構成

本研究では、機械加工を行う工作機械として小型の CNC 旋盤を取り扱う。基本的には、マシニングセンタやロボットなどについても同様の議論を行うことが可能であり、ここでの議論の多くはそれらの生産設備についても当てはまる。

一般に工作機械が加工を行う動作を実現するモータは、その動作のために専用化された CNC によって制御されている。このような工作機械は、あらかじめ定められた動作を忠実に繰り返す操作に適しているが、加工状況を判断する機能についてはまだ十分に開発が行われているとは言えず、

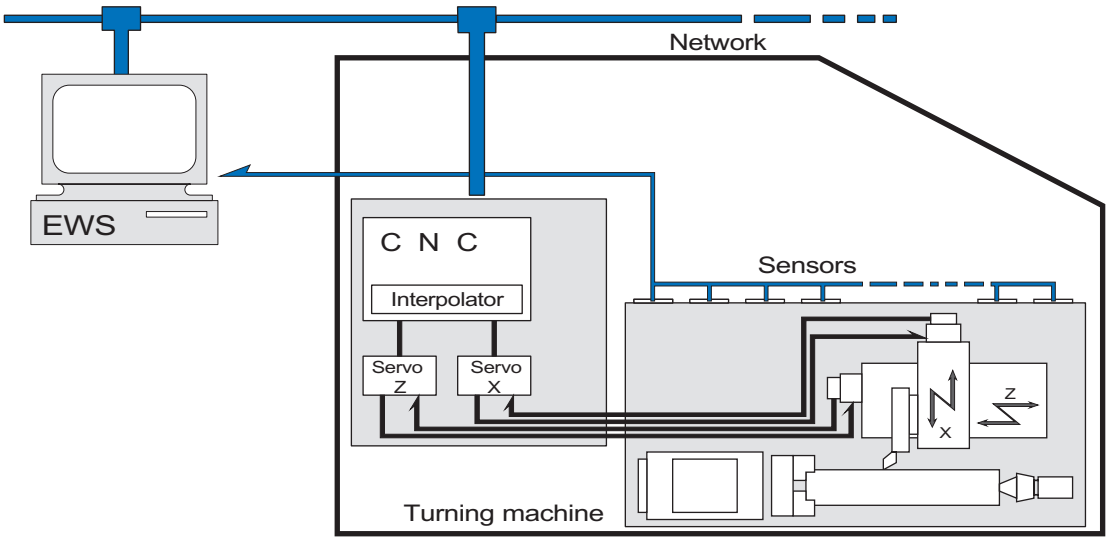


図 3.3: Allocation of EWS and CNC lathe

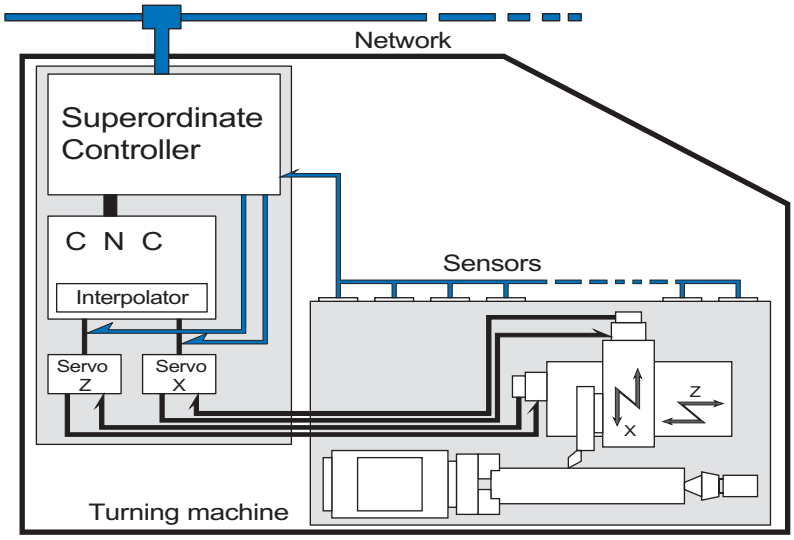


図 3.4: Logical structure of CNC lathe

今後の課題とされている。このような工作機械に対して、状況に応じて適切な判断をするより高機能な工作機械の構築を行うためには、基本的には状況を検出するためのセンサとその情報を処理し、あらたな動作計画を立案するための情報処理装置 (計算機) が付加的なシステム要素として必要になると考えられる。

図 3.3 は、一般的な CNC 旋盤と、CNC 旋盤に取りつけたセンサによって収集される情報を処理し、作業者に代って CNC 旋盤を操作する計算機との結合関係を示している[注 2]。

[注 2]計算機は作業者と考えても一般性は失われない

このような計算機が、複数の工作機械に対してその役割を果たす場合には、計算機は、工作機械と同様に生産システムを構成するシステム要素の一つとして捕えた方が適切である。しかし、計算機が特定の工作機械のみについて、その役割を担うのであれば、計算機は工作機械というシステムを構成するシステム要素の一つとして考えた方が理解しやすい。

図 3.4 は、計算機を工作機械を構成するシステム要素の一つして取り扱った場合の論理的な工作機械の構成と工作機械を構成する他のシステム要素との物理的な結合関係を模式的に示している。このように工作機械を捕えることにより、個々のシステム要素にどのような機能を分担させると都合が良いかを考える上で役に立つ。また生産システムを構成する際に、工作機械内部で隠蔽させることのできる情報あるいは機能と、他のシステム要素である工作機械やロボットに公開すべき情報の認識が容易になると考えられる。

次節では、このような論理構成を前提として、センサから獲得される情報を利用することにより、状況の変化に対応することが可能な高度な機能を備えた工作機械に関する検討結果について整理する。

3.3　工具摩耗量のインプロセス推定

本節では、工作機械システムを構成する要素間で取り扱われる情報の中から加工中に生じる現象を取り上げ、その 1 例として工具摩耗の検出方法に関する検討結果についてまとめる。

工具摩耗の検出は、安定した生産活動を行う上で最も重要な行為のひとつとして考えられる。一般に、大量生産を前提として構築された生産システムのように、工作機械が単一の加工を対象としている場合には、工具摩耗の推移はあらかじめある程度の予測が可能である。そのため、工具の使用時間による管理を行うことで、工具摩耗による加工品質の低下や欠損による不良品の発生を予防することが可能である。しかし、本研究で対象とするように、変種変量生産を目的とした生産システムのように、工作機械が異なった材料、異なった形状の機械加工を行うことを前提とした場合には、工具摩耗の推移を予測することは難しくなる。そのため、センサなどの手段を用いて加工中に工具の摩耗状態を推定する方法 [1] が要求される。ところが、工具刃先付近は、高温かつ高圧の状態にあり、また切屑や切削油などが存在するために、監視が困難な対象として認識されている。

本節では、工作機械の情報処理機能のひとつとして、加工中に加工場から検出可能な物理量を利用することにより、工具摩耗状態の推定を行った結果についてまとめる [2][3]。

3.3.1　AE 信号とコーティング工具

AE(Acoustic Emission) は物体が塑性変形を起こす際に生じる弾性波の一種であり、摩耗や微小欠損 (chipping) などの極めて微細な現象に鋭敏に対応すると言われている。また通常その周波数帯域が超音波領域にあり、多くの場合 100kHz から 1MHz の周波数帯域で信号の測定、解析が行われる。そのため、工作機械や工具、被削材の動特性や通常の振動騒音の受けにくいと考えられ、直接切削状態の監視を行うことが可能である。このような理由から工具摩耗の状態を把握するために DE 信号を監視することは有望であると考えられる [4] – [13]。 切削時間とともに進行する工具摩耗を検出する方法は、これまでいくつか提案されている。そのひとつは、切削過程から検出される DE 信号のうち、特定の閾値を越える AE 信号の事象数を計数するものである [14]。その他にも、AE 信号の実効値が工具の摩耗に伴って増大することに着目した方法 [15] や、統計的に処理

し、求められた歪度、尖度などの統計量と工具摩耗の相関を求めたもの [16] などがあげられる。しかし、一般に AE 信号の発生源としては種々の要因が考えられ、AE 信号から得られる特徴量の変化がただひとつの現象 (たとえば、工具摩耗) の変化を表しているとは限らない、そこで AE 信号から個々の発生源における現象の変化を推定するためには、単一の処理ではなく、複数の処理を行い、そこから得られる個々の情報を適切に取捨選択する必要がある。

図 3.5 に、代表的な工具摩耗の形態を示す。工具摩耗は切りくずとの接触部で漸進的に工具材料が損失する現象であり、工具すくい面に生じるクレータ摩耗と、工具逃げ面に生じる逃げ面摩耗とに分けられる。一般に工具摩耗の大きさは、図 3.5 に示すように、摩耗各部の幅や深さを長さの次元で評価する。各摩耗のうちで、逃げ面平行摩耗幅や境界部に生じる境界摩耗幅、およびクレータ摩耗の最大深さは工具寿命の判定基準として用いられる重要な量である。

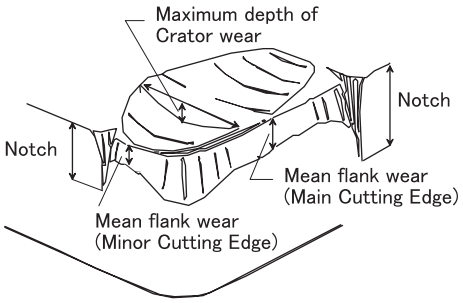


図 3.5: Tool wear

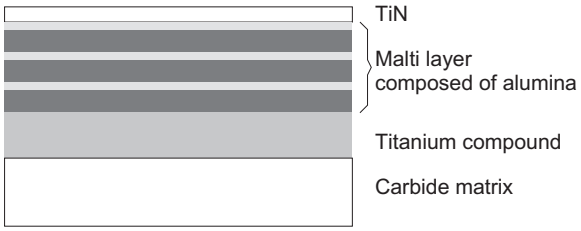


図 3.6: Structure of coated Tool

ここで使用するコーティング工具は主として鋼類の粗加工時の効率化を目的に開発された工具であり、超硬合金を母材としセラミックスを主成分とした多層のコーティングを施した工具である。図 3.6 に本研究で使用するコーティング工具の構造を模式的に示す。

この工具を用いて旋削加工を行なうと、摩耗量の増加に伴って、AE 信号の発生源となる箇所の材質が変化するため、観測される AE 信号の波形に特徴的な変化が生じる。このような特徴は、特にすくい面における摩耗、すなわちクレータ摩耗の進行に伴って生じることが実験的に確認されている。

本研究では、この AE 信号の波形の変化を捕らえることで、切削中の工具摩耗量の状態を推定することを試みる。従来の研究で行なわれているような、切削力の大きさや AE 信号の大きさに着目する手法と異なり、切削条件の影響を受けにくいことが期待できる。

3.3.2 実験装置および実験条件

切削加工時に工具摩耗に伴って検出される AE 信号を検出するために、無段変速機付き高速旋盤を用いて、一定の切削速度で切削実験を行った。図 3.7 に実験に用いた汎用旋盤の外観および装置の概要を示す。また使用した汎用旋盤の主な仕様を表 3.1 に示す。合わせて実験に使用した工具および工具ホルダの仕様を示す。

ニューラルネットワークの学習および検証のために用いた工具摩耗量は、一定の旋削加工を行った後、接触式粗さ計によりすくい面摩耗深さを測定した。このとき、前切れ刃から $0.5mm$ ないし $0.25mm$ の間隔で 8 箇所の工具すくい面の形状を測定し、得られたプロファイルのから、最大値を

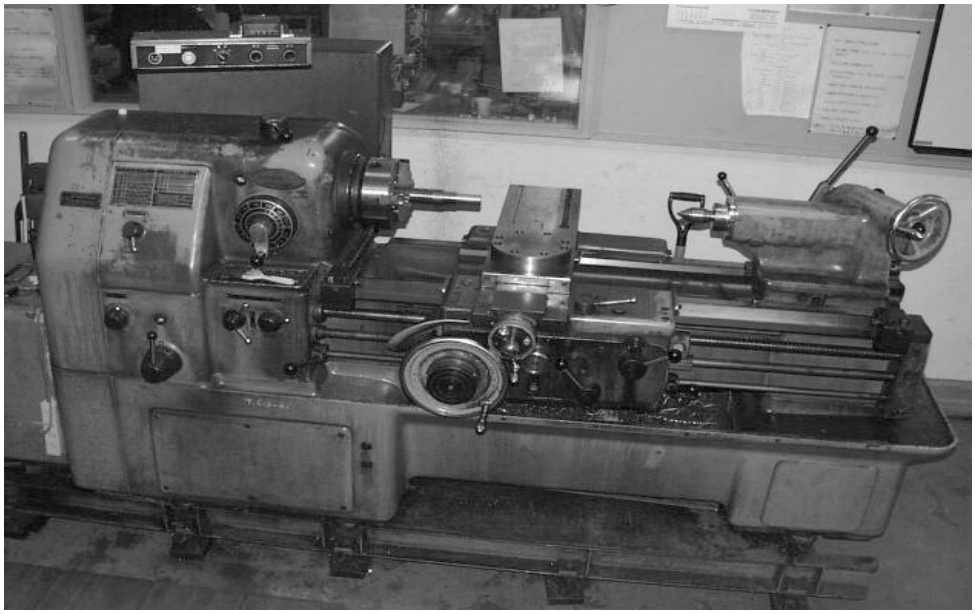


図 3.7: Apparatus of Lathe

表 3.1: Specification of experimental equipments

無段変速装置つき高速旋盤	大隈 LS 型、オークマ株式会社製
	電動機出力 7.5 kW ベッド上の振り 450 mm 両センタ間の距離 800mm
多層コーティング工具	住友電工イゲタロイ株式会社製 AC10G
	超硬合金母材に、順次 TiC, TiB_2 (特殊セラミックス), Al_2O_3 のコーテイングを施したもの。コーティングの厚みは全体で $6-8\mu m$。
工具ホルダ	住友電気工業 (株) 社製 CSBNR2525
	横すくい角 −6 °前すくい角 −5 ° 横逃げ角 6 °前逃げ角 5 ° 横切れ刃角 25 °前切れ刃角 25 ° 25 × 25 mm のシャンクを有するクランプオン式ホルダ。 工具ホルダの後端は、AE センサを取りつけるために研磨してある。
被削材	一般構造用炭素鋼 (S45C)

すくい面摩耗量とした。

図 3.8 に AE センサの取り付け状態を模式的に示す。AE センサーは工具シャンク後端にバネによって機械的に押しつけ、取り付け状態を一定に保たれるように工夫している。図 3.9 に本実験の情報処理の流れを模式的に示す。旋削加工時に AE センサによって検出された AE 信号は、増幅と実効値処理を施した後、データレコーダを介しディジタル化され計算機に採取される。

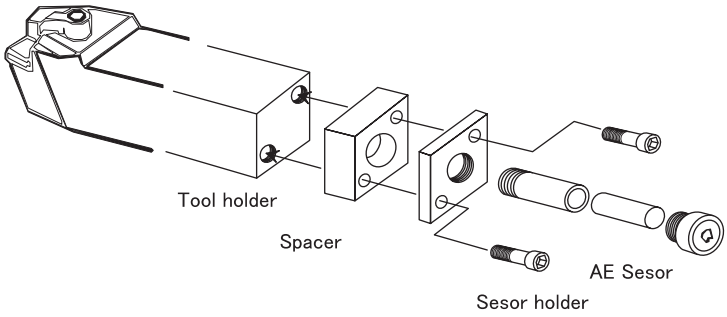


図 3.8: tool holder

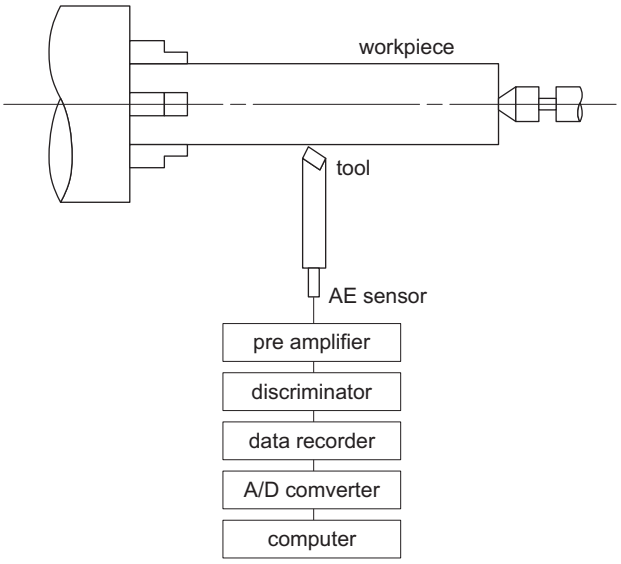


図 3.9: AE system

3.3.3 ニューラル・ネットワークの構造

本研究では，優れた識別関数であると同時に学習機能を備えた情報処理手段としてニューラルネットワーク [17] を利用する。ここでは階層型のネットワークであるパーセプトロン型ニューラルネットワーク [18] – [20] を採用する．パーセプトロン型ニューラルネットワークモデルは 図 3.10 に示されるような構造をしている．各層には処理ユニット（以下単にユニットと記す）があり，ユ

ニットは各層の間でリンクによって結合されている．各ユニットは，他のユニットあるいは外界から入力（刺激）を受け，リンクで結合された田のユニットあるいは外界に出力を出す．リンクにはそれぞれ固有の重みがあり，ユニットから出される出力は，この重みによって重みづけられ，他のユニットに伝えられる．

ユニットは，外界からの入力を受け取るユニットを入力ユニット，出力を外界に出すユニットを出力ユニットとよび，それ以外のユニットを隠れユニットと呼ぶ．同様に各層をはそれぞれ，入力層，出力層，隠れ層と呼ばれる．

このネットワークモデルでは，同一層内でのリンクによる結合は存在しないものとする．さらに，刺激は入力層から出力層に向かって順次伝えられ，刺激がフィードバックされるようなことは無いものとする．

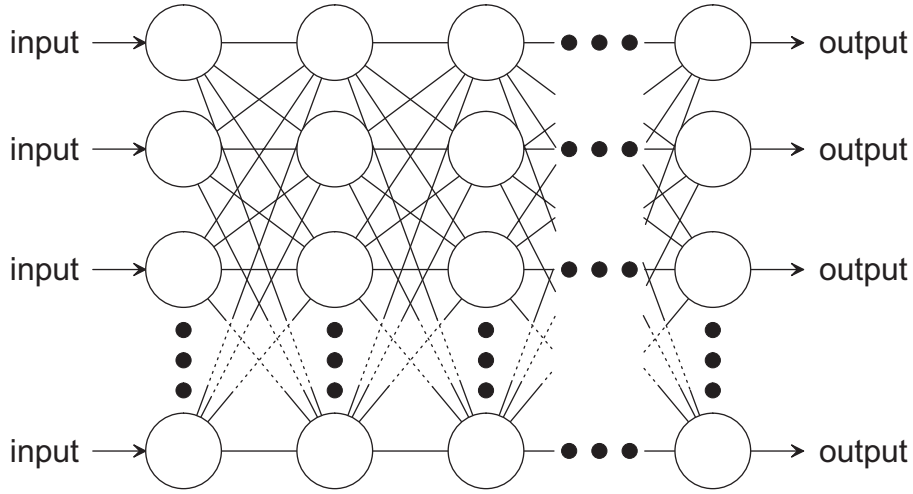


図 3.10: Neural network

ニューラルネットワークは，このリンクの重みを学習によって変化されることによってある意味で最適なパターン認識をするように構築することができる．

結合の重みの変化量が、理想出力と実際の出力との差に依存して決まるような重みの学習方法を、Delta Rule という。この Delta Rule を非線形素子によって構成される多層回路に拡張したものを、 Generalized Delta Rule という。以下にこの学習方法による重みとしきい値の修正方法を示す。

ニューラルネットワークモデルにおいて各ユニットへの入力を x_j^L、またユニットからの出力を o_j^L とする。

これらの入力と出力の間には、状態遷移関数 $h(x)$ によって次の関係が定義されている。

$$o_j^L = h(x_j^L - \theta_j^L)$$

ここで $h(x)$ は微分可能な単調非減少、非線形関数であると仮定しておく。$h(x)$ には　図 3.11 に示されるようなシグモイド型のロジスティック関数が通常良く用いられる。図 3.11 から分かる

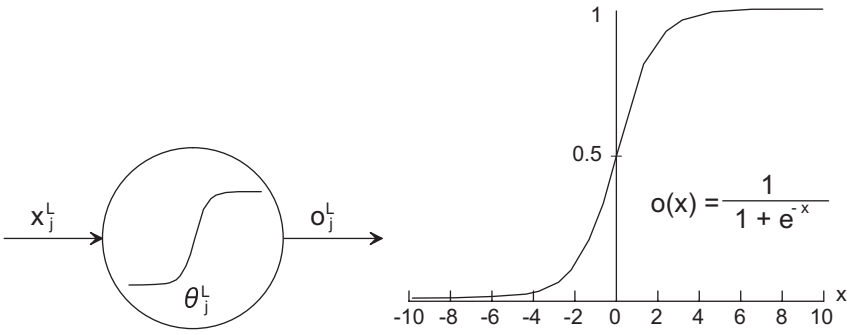


図 3.11: Processing in unit and sigmoid function

ように、各ユニットはそのユニットが持つしきい値よりも大きな入力（刺激）にのみ発火し、1 の出力を出す。

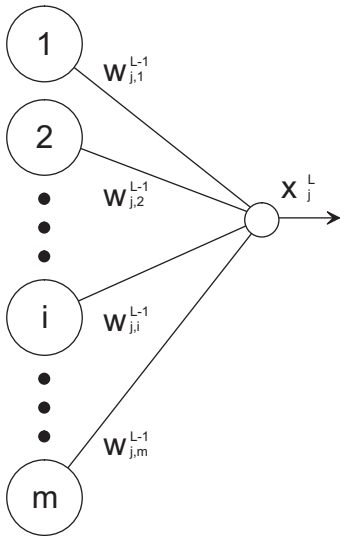


図 3.12: Relationship between weighted output and input

入力層以外の層でのユニットへの入力には、図 3.12 に示されるように 1 層前からのユニットの出力 o^{L-1} をリンクの持つ重み w_{ji}^{L-1} で重みづけて得る。

すなわち、

$$x_j^L = \sum_{i=1}^{m} w_{ji}^{L-1} o_i^{L-1}$$

ここで第 $L-1$ 層のユニット i から第 L 層のユニット j への重みを w_{ji}^{L-1} で表すことにする。以下同様に添え字はその文字が属する層、あるいはユニットを表すものとする。

3.4　ニューラル・ネットワークの学習方法

前章で述べた手順に従って，入力層から隠れ層を経て出力層へ計算を進めていく。このとき、ニューラル・ネットワークの評価関数として、理想出力と実際の計算によって得られる出力層での出力との差を誤差エネルギーとして表現する。

すなわち、

$$E = \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{2}(r_k - o_k)^2 \tag{3.1}$$

前述のように、ニューラルネットワークは学習によって重みとしきい値を変化させていく。このとき修正量を次のように決める。重みの修正量を Δw_{ji} とすれば、Δw_{ji} が誤差関数の最急降下方法になるように定義する。

すなわち、

$$\Delta w_{ji} = -\frac{\partial E}{\partial w_{ji}} \tag{3.2}$$

また入力 x_j による誤差関数の最急降下方向を δ として、次のように定義する。

$$\delta_j = -\frac{\partial E}{\partial x_j} \tag{3.3}$$

式 (3.2) を用いて 式 (3.3) を変形する。

$$\begin{aligned}
\Delta w_{ji}^L &= -\frac{\partial E}{\partial w_{ji}^L} \\
&= -\frac{\partial E}{\partial x_j^{L+1}} \frac{\partial x_j^{L+1}}{\partial w_{ji}^L} \\
&= -\frac{\partial E}{\partial x_j^{L+1}} \frac{\partial}{\partial w_{ji}^L} \sum_{i=1}^{m} w_{ji}^L o_i^L \\
&= \delta_j^{L+1} o_i^L
\end{aligned} \tag{3.4}$$

つぎに δ_j^L を具体的に求めていく。

[j **が出力層における** j **番目のユニットに関する添え字であるとき**]

式 3.1 の定義から、

$$\begin{aligned}
\delta_j &= -\frac{\partial E}{\partial x_j} \\
&= -\frac{\partial E}{\partial o_j} \frac{\partial o_j}{\partial x_j} \\
&= (r_j - o_j) h'(x_j - \theta_j)
\end{aligned}$$

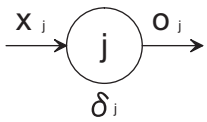


図 3.13: unit j on output layer

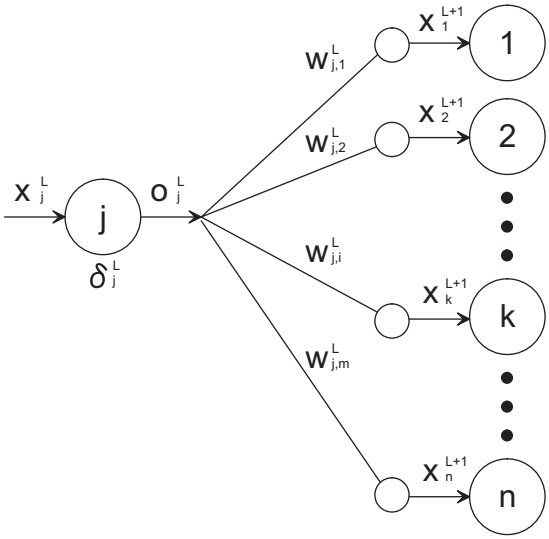


図 3.14: unit j on hidden layer

[j **が隠れ層における** j **番目のユニットに関する添え字であるとき**]

$$\begin{aligned}
\delta_j^L &= -\frac{\partial E}{\partial x_j^L} \\
&= -\frac{\partial E}{\partial o_j^L}\frac{\partial o_j^L}{\partial x_j^L} \\
&= -(\sum_{k=1}^{n}\frac{\partial E}{\partial x_k^{L+1}}\frac{\partial x_k^{L+1}}{\partial o_j^L})\frac{\partial o_j^L}{\partial x_j^L} \\
&= (\sum_{k=1}^{n}\delta_k^{L+1}w_{kj}^L)h'(x_j^L-\theta_j^L)
\end{aligned} \tag{3.5}$$

同様にしてしきい値の修正量 $\Delta\theta_j$ を求める。
ここでも $\Delta\theta_j$ が誤差関数の最急降下方向になるように定義する。
すなわち、

$$\Delta\theta_j = -\frac{\partial E}{\partial \theta j}$$

[j **が出力層における** j **番目のユニットに関する添え字であるとき**]

$$\begin{aligned}\Delta\theta_j &= -\frac{\partial E}{\partial \theta_j} \\ &= -\frac{\partial E}{\partial o_j}\frac{\partial o_j}{\partial \theta_j} \\ &= -(r_j - o_j)h'(x_j - \theta_j) \\ &= -\delta_j\end{aligned} \tag{3.6}$$

[j **が隠れ層における** j **番目のユニットに関する添え字であるとき**]

$$\begin{aligned}\Delta\theta_j^L &= -\frac{\partial E}{\partial \theta_j^L} \\ &= -\frac{\partial E}{\partial o_j^L}\frac{\partial o_j^L}{\partial \theta_j^L} \\ &= -(\sum_{k=1}^{n}\frac{\partial E}{\partial x_k^{L+1}}\frac{\partial x_k^{L+1}}{\partial o_j^L})\frac{\partial o_j^L}{\partial \theta_j^L} \\ &= (\sum_{k=1}^{n}\delta_k^{L+1}w_{kj}^L)h'(x_j^L - \theta_j^L) \\ &= -\delta_j^L\end{aligned} \tag{3.7}$$

3.4.1　特徴量

AE 信号は時間領域において一定のサンプリング時間内に測定された信号に対して以下のように基本統計量を求め、その信号の特徴量とした。

ここでは、離散化された AE 信号の振幅値を $x_0, x_1, \cdots, x_i, \cdots, x_{n-1}, (1 \leq i \leq n-1)$ とし、次式に従い基本統計量を算出した。

平均値 (mean)

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n-1} x_1$$

分散 (variance)

$$\sigma^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n-1}(x_i - \bar{x})^2$$

変動係数 (coefficient of variation)

$$\delta = \frac{\sigma}{\bar{x}}$$

ひずみど
歪度

歪度に関しては 2 通りの定義式がある。通常用いられる歪度は平均値回りの 3 次の積率であり、信号が正規分布に従う場合は、その値がゼロになる。従って 3 次の積率を用いた場合は信号の確率密度関数が正規分布のものに対してどれだけ歪んでいるかを知る目安になる。これは次式で定義される。

$$\beta_1 = \frac{\frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n-1}(x_i - \bar{x})^3}{\sigma^3}$$

第 2 の定義式は、確率密度関数においてもっとも多く現れる信号値、すなわちモード値に対して、信号の平均値がどれだけ偏っているかを知る尺度である。これは、K.Pearson によって提案されたもので、通常は算出方法が面倒であるので前式の歪度の定義式が用いられるが、AE 信号の解析の場合、モード値が信号の代表値として用いられることもあるため検討の対象とした。

これは次式で表される。

$$\beta_1 = \frac{mode - \bar{x}}{\sigma}$$

とがりど
尖度

尖度は、平均値回りの 4 次の積率で与えられる。正規分布に従う信号の 4 次の積率の値は 3 になる。そのためここで用いた定義式では、4 次の積率から 3 を差し引いたものを採用した。従って、尖度の値は正規分布に従う信号の確率密度関数に比べて、対象としている信号の確率密度関数がどれだけ尖っているを知る目安になる。

これは次式で定義される。

$$\beta_1 = \frac{\frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n-1}(x_i - \bar{x})^4}{\sigma^4} - 3$$

なお信号のもつ確率密度関数を推定する際に、歪度と尖度を用いる方法がある。一般に歪度と尖度の値は確率分布に応じた一定の関係を保っているのが普通である。すなわちひとつの確率分布に対して歪度と尖度を計算し、(歪度-尖度) 平面に図示すれば、その関係は平面上の一点で表される場合もあれば、また確率密度関数のもつ母数の影響を受けて、直線や曲線になったり、さらには領域になったりする場合もある。たとえば一様分布や正規分布などは一点で表され、対数正規分布、Γ 分布などは曲線、ベータ分布は領域で表される。こうした性質を用いて、求めた歪度および尖度の値を (歪度-尖度) 平面に打点し、そのもっとも金ぷにある (歪度-尖度) 関係をもつ確率密度関数を、対象としている信号に最も適合する確率密度関数として採用する方法がある。この場合には、純粋に平均値回りの 3 次の積率、4 次の積率を歪度および尖度として定義する。

3.4.2　実験結果および工具摩耗の推定結果

比較的重切削である加工条件下において旋削実験を行ない、工具摩耗量の測定と切削中に観測される AE 信号の測定を行なった。

工具すくい面上の摩耗であるクレータ摩耗の最大深さと横逃げ面の摩耗であるフランク摩耗の平均摩耗量を測定した結果を図 3.15 に示す。また、旋削加工中に観測される AE 信号の 1 例を図 3.16 に示す。図に示した AE 信号は、工具の寿命に至るまでに観測される波形を 4 分おきに無作為に抽出したものである。

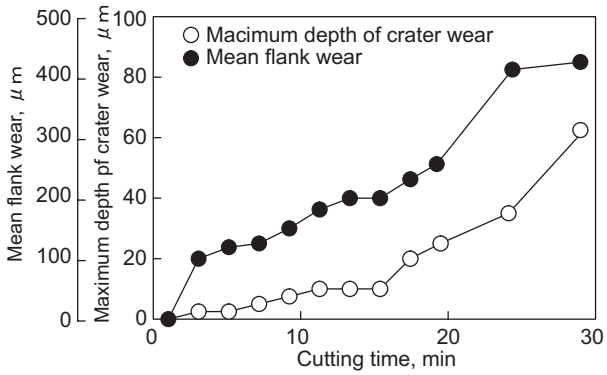


図 3.15: Examples of wear of coated tool
Cutting speed 200 m/min Depth of cut = 2.0 mm Feed rate = 0.38 mm/rev

図 3.16 から明らかなように、切削を開始した直後には、AE 信号の実行値は小さく、周期的な突発的の信号を多く含む波形が観測される。このような AE 信号は、すくい面の摩耗最大深さがコーティング層の厚さである $6\mu m$ から $8\mu m$ 程度に達するまで観測される。その後、信号は徐々に実行値が大きくなり突発的な波形は観測されなくなる。さらにすくい面の摩耗量が増大し、工具が寿命に近づくと、AE 信号の波形は変動の大きなものへと変化する。従って、この波形の変化を適切に捕らえることができれば、加工中の工具の摩耗状態を推定することが可能になると考えられる。

ここでは、これらの信号の持つ特徴を定量的に捕らえるために、AE 信号に対する基本統計量を計算する。図 3.17 は、基本的な 6 種類の統計量の計算結果を示している。統計量のうち、平均値、分散値、変動係数の間に見られる関係は、比較的説明しやすい。すなわち、平均値にみられるように、AE 信号の実行値の値は、切削の初期には比較的小さい値をとり、摩耗の増加とともに次第に増加していく。この値は、切削開始後 10 分に最大となる。この時刻は、すくい面情の摩耗最大深さがコーティング層の厚さである $6 - 8\mu m$ に達する時刻に対応する。その後信号の値は、急激に低い値をとるようになり、しばらくの後に再び高い値をとる。

他方、分散の値は切削の初期には突発型の信号の影響を受け、比較的大きい値をとる。波形が滑らかになるとこの値は、初期の突発型の信号の場合と同程度かあるいはそれよりも小さい値をとる。さらに摩耗が進行し工具の寿命に近づくにつれ、分散値も大きい値をとるようになる。

これらの 2 つの統計量の変化を合わせた特徴が、変動係数の値に現れる。すなち、切削の初期に大きい値をとり、次第に小さい値に変化し、再び高い値をとる。これはちょうど平均値とは逆の変化であるが、平均値よりもその変化が緩慢に生じる。

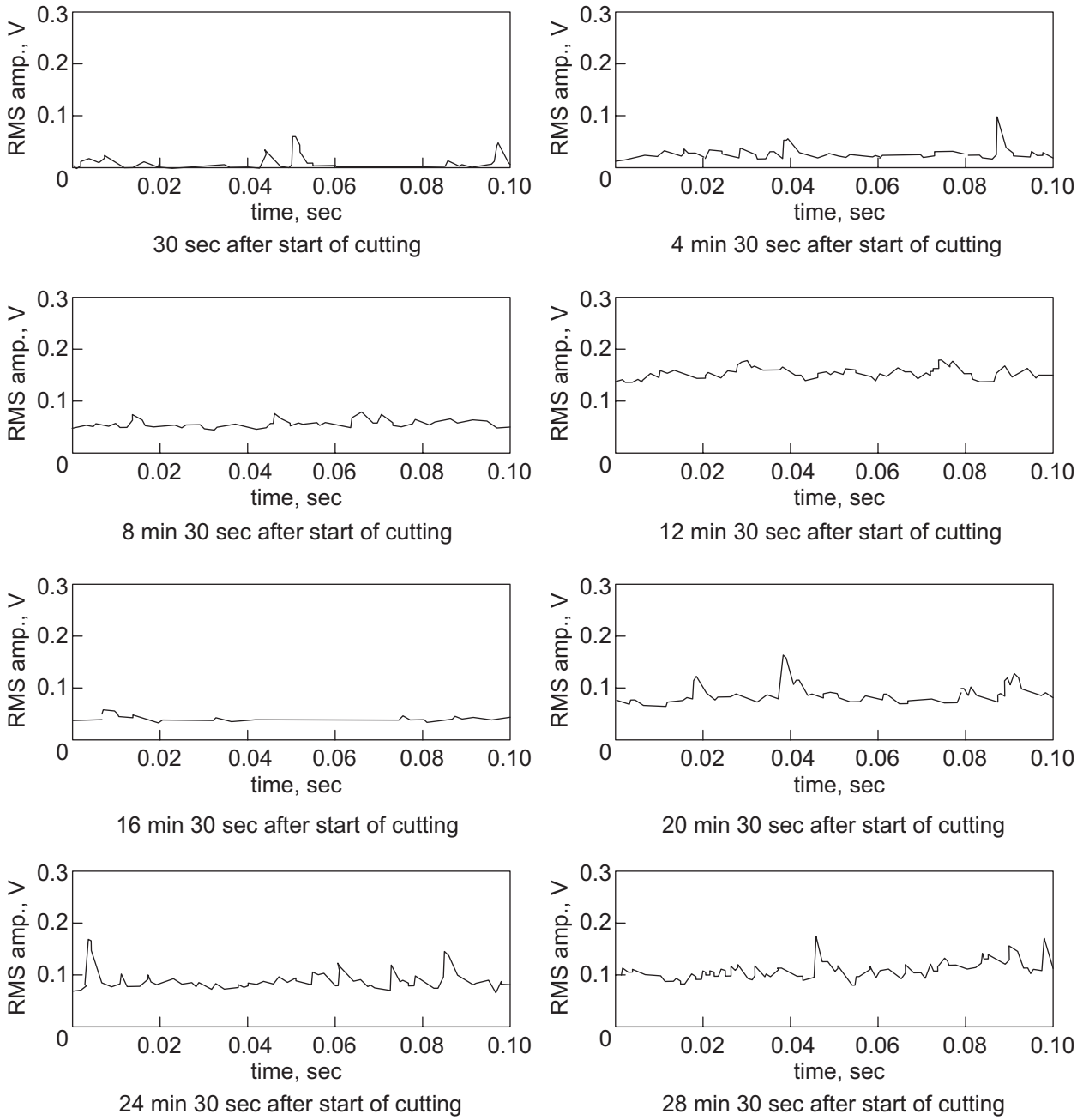
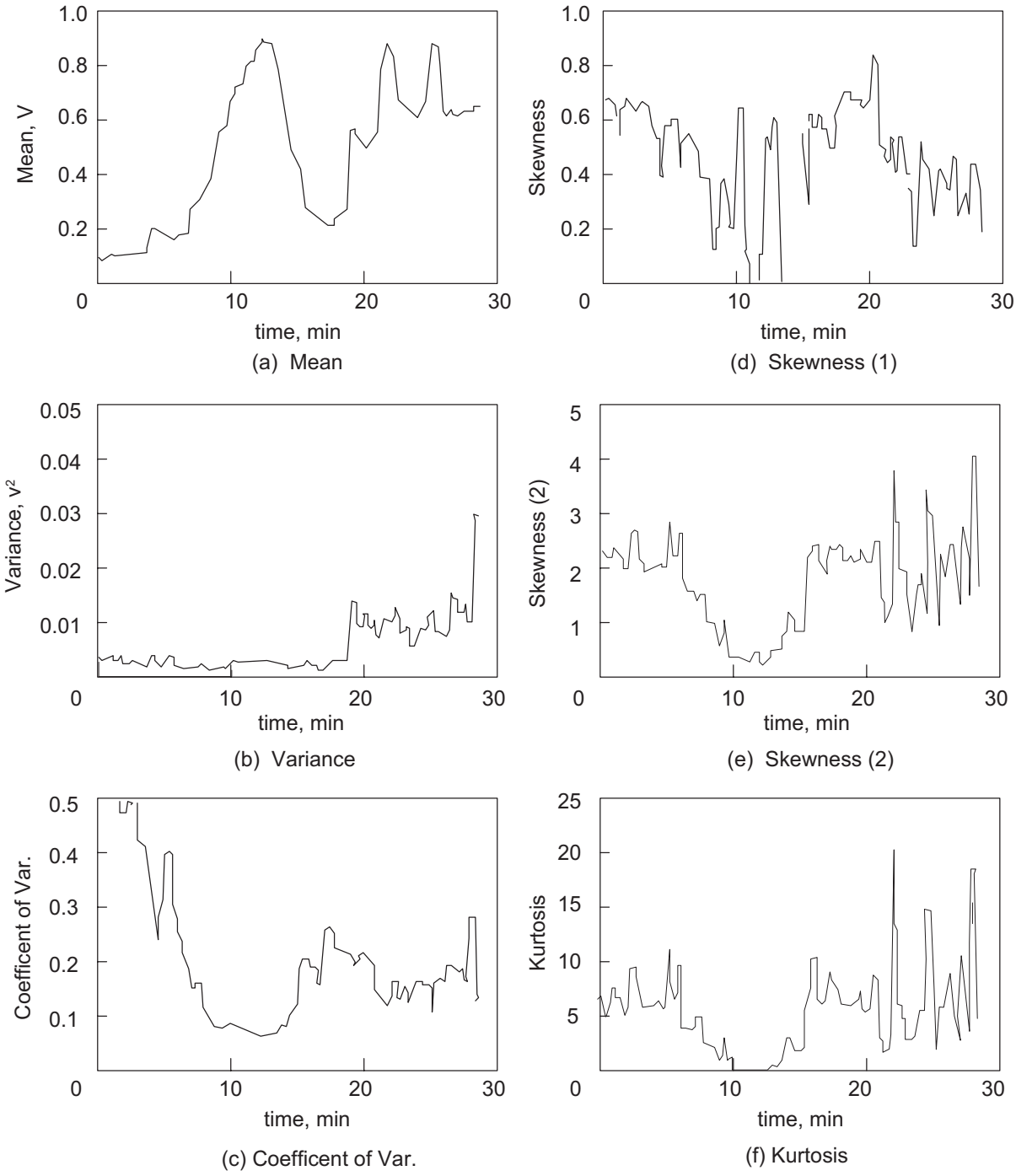

RMS amp., V
0.3
0.2
0.1
0
0.02
0.04
0.06
0.08
0.10
time, sec
30 sec after start of cutting
4 min 30 sec after start of cutting
8 min 30 sec after start of cutting
12 min 30 sec after start of cutting
16 min 30 sec after start of cutting
20 min 30 sec after start of cutting
24 min 30 sec after start of cutting
28 min 30 sec after start of cutting

図 3.16: Typical examples of RMS value of measured AE signal at various stages of tool wear

Cutting speed 200 m/min Depth of cut = 2.0 mm Feed rate = 0.38 mm/rev



Cutting speed 200 m/min Depth of cut = 2.0 mm Feed rate = 0.38 mm/rev

図 3.17: Statistical values of AE signal plotted against cutting time.

歪度は、先に述べたように 2 通りの定義式に基づいて統計値を求めている。ここでは、モード値と平均値の差を標準偏差で基準化したものをタイプ 1 とし、3 次の積率をタイプ 2 としている。タ

イプ 1 の歪度は切削の中期における値が大きく変動している。また、寿命に近づくと他の統計量の値が増大する傾向が見られるのに対して、この歪度の値は減少する傾向が見られる。タイプ 2 の歪度および尖度の値はともに良く似た傾向を示す。

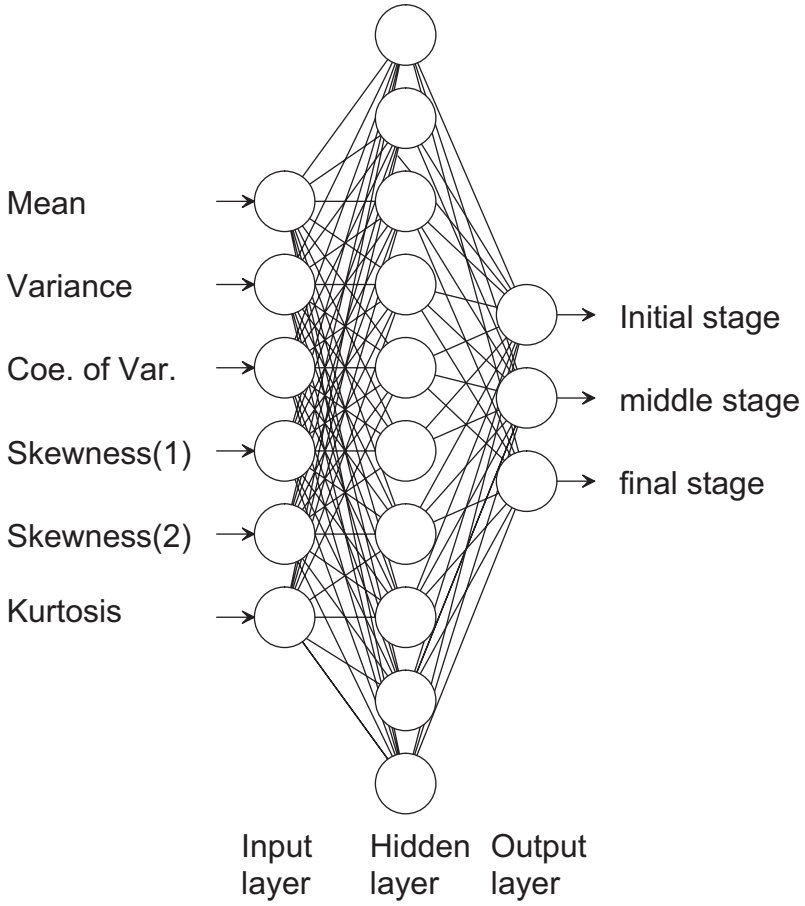
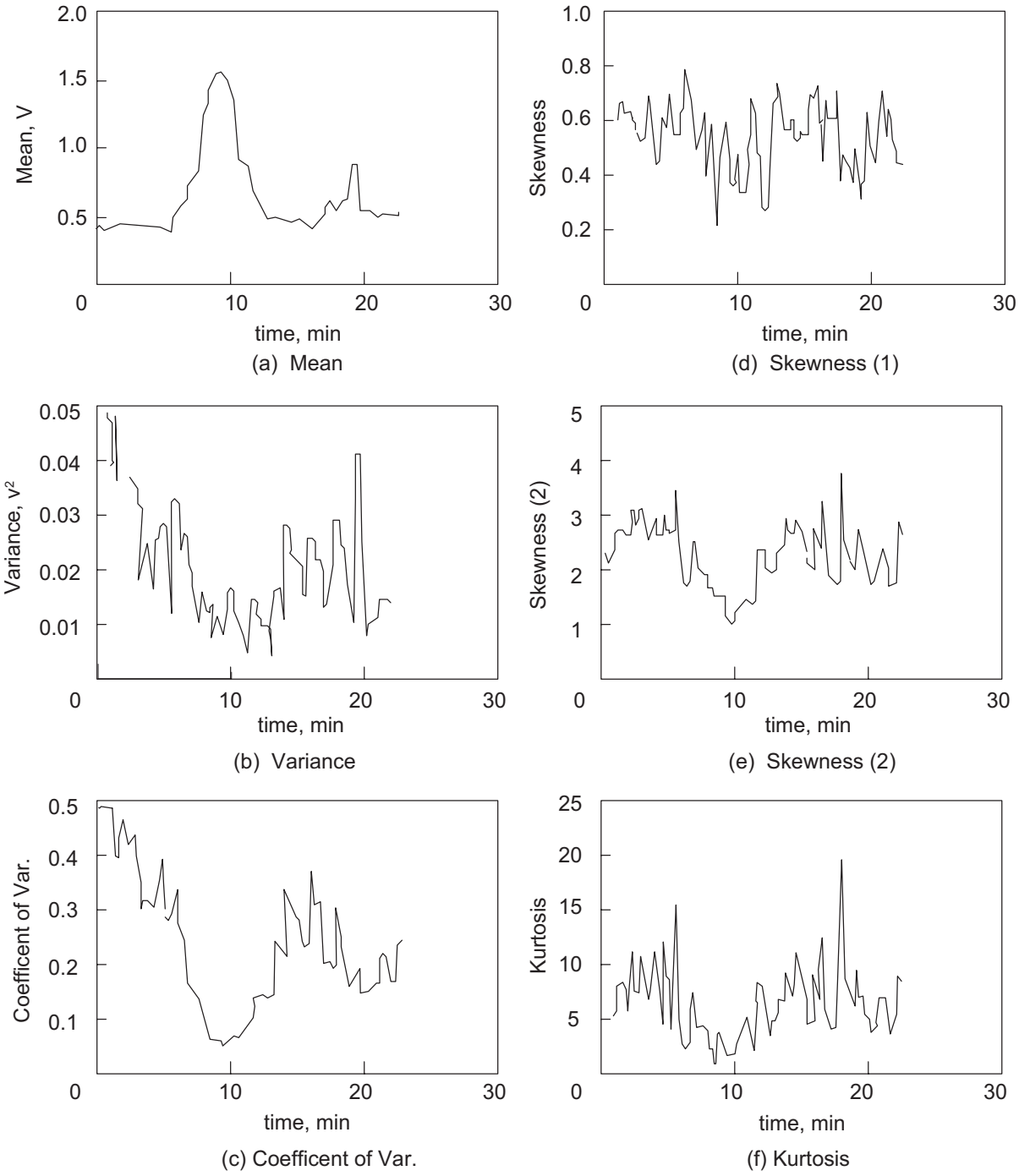


図 3.18: Structure of neural network

これらの結果を用いて、摩耗量を推定するためのニューラルネットワークの構築を行なう。ニューラルネットワークへの入力値は、6 種類の統計量の値をそのまま利用する。すなわち、平均値、分散値、変動係数、歪度 1、歪度 2、および尖度の値を成分とする 6 次元のベクトルを構成し、これをパターンベクトルとして入力ユニットに提示した。本研究で用いたニューラルネットワークは、教師ありの学習を行なう。そのため入力値と同時に、その入力に対する正解、すなわち理想出力を準備する必要がある。ここでは、工具の摩耗状態を、AE 信号の波形変化に基づいた分類に従い、摩耗初期、摩耗中期および摩耗終期の 3 つに分類している。具体的には、工具すくい面における摩耗最大深さがコーティング層の厚みである $6-8\mu m$ 以下のときに算出される統計量の値をクラス 1 とし、同様に $6-24\mu m$ までをクラス 2、$24\mu m$ 以上をクラス 2 とする。このため、ニューラルネットワークの入力層には 6 ユニットを設定し、出力層を 3 ユニットを設ける。また隠れ層のユニットは、入力層に直結するユニット数を比較的に十分にとる目的で 10 ユニットとする。図 3.18 に、推定に用いたニューラルネットワークの構造を模式的に示す。

図 3.17 に示す統計量は、形成したニューラルネットワークの評価用とし、ネットワークの学習

用には用いなかった。学習には、同一の切削条件で別に行った実験から得られた結果を用いた。図 3.19 は、ニューラルネットワークの学習に用いた統計量を示している。またこの時に得られた工具の摩耗量を図 3.20 に示す。



Cutting speed 200 m/min Depth of cut = 2.0 mm Feed rate = 0.38 mm/rev

図 3.19: Statistical values of AE signal plotted against cutting time.

図 3.19 の結果と先に示した図 3.17 の結果を比較すると、図 3.19 の結果では、切削の後半において平均値が、また切削の前半において分産地の値がそれぞれ図 3.17 の結果と異なることが理解できる。しかし、その他の特計量の変化については、その傾向が全般に良く一致していることが分かる。

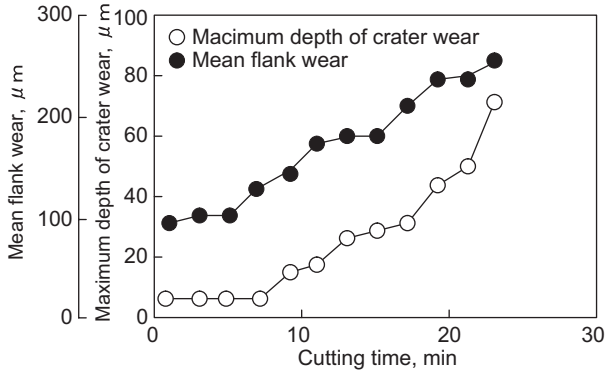


図 3.20: Examples of wear of coated tool
Cutting speed 200 m/min Depth of cut = 2.0 mm Feed rate = 0.38 mm/rev

表 3.2: Summary of estimated state of tool wear. (Result of self-discrimination) The data corresponds to the experimental results shown in Fig 3.19

sec						Maximum depth	sec						Maximum depth
	5	15	25	35	45	of		5	15	25	35	45	of
min						creator wear	min						creator wear
0	1	1	1	1	1	7.0	12	3	3	3	3	3	26.0
1	1	1	1	1	1		13	3	3	3	3	3	
2	1	1	1	1	1	7.0	14	3	3	3	3	3	29.0
3	1	1	1	1	1		15	3	3	3	3	3	
4	1	1	1	1	1	5.0	16	3	3	3	3	3	32.0
5	1	1	1	1	1		17	3	3	3	3	3	
6		2	2		2	6.0	18	3	3	3	3	3	44.0
7			2	2			19	3	3	3	3		
8	2	2	2	2	2	15.0	20	1	3	3	3	3	50.0
9	2	2	2	2	2		21	3	3	3	3	3	
10	2	2	2	2	2	18.0	22	3	3	3	3	3	70.0
11	2	2	2		2								

Note: Numbers 1,2 and 3 corresponds to initial, middle and final state of tool wear respectively.

図 3.19 の結果を用いてニューラルネットワークの学習を行った。表 3.2 は、教師用に用いたパターンベクトルを、このニューラルネットワークを用いて自己判別した結果を示す。評注の左端の

列は、切削を開始してからの分数を示しており、再上段の行は、各時間毎の秒数を示している。さらに右端の列に実験の際に測定した工具すくい面上の摩耗最大深さを示す。

表 3.3: Estimated state of tool wear. (Application to unknown data) The data corresponds to the experimental results shown in Fig 3.17

sec min	5	15	25	35	45	Maximum depth of creator wear	sec min	5	15	25	35	45	Maximum depth of creator wear
0	1	1	1	1	1	0.0	15	2	3	3	3		
1	1	1	1	1	1		16	3	1	1	1	3	20.0
2	1	1	1	1	1	2.0	17	1	3	3	3	1	
3	1	1	1	1	1		18	1	1	1	1	1	24.0
4	1	1	1	1	1	3.5	19	2	2	2	2	2	
5	1	1	1	1	1		20	3	2	3	2	3	
6	1	1	1	1	1	5.0	21		2	2	2	2	
7	1	3	3	3	3		22	2	2	2	3	2	
8	3	3	3	3	3	8.0	23	3	3	3	3		34.0
9			2	2			24	3	2	3	2	2	
10	2	2	2	2	2	10.0	25	3	2	2	3	2	
11	2	2	2	2	2		26	3	3	3	3	2	
12	2	2	2	2	2	11.0	27	3	2	3	3		
13	2	2	2	2	2		28	3	3	2	3	3	60.0
14	2	3	2			10.0							

Note: Numbers 1,2 and 3 corresponds to initial, middle and final state of tool wear respectively.

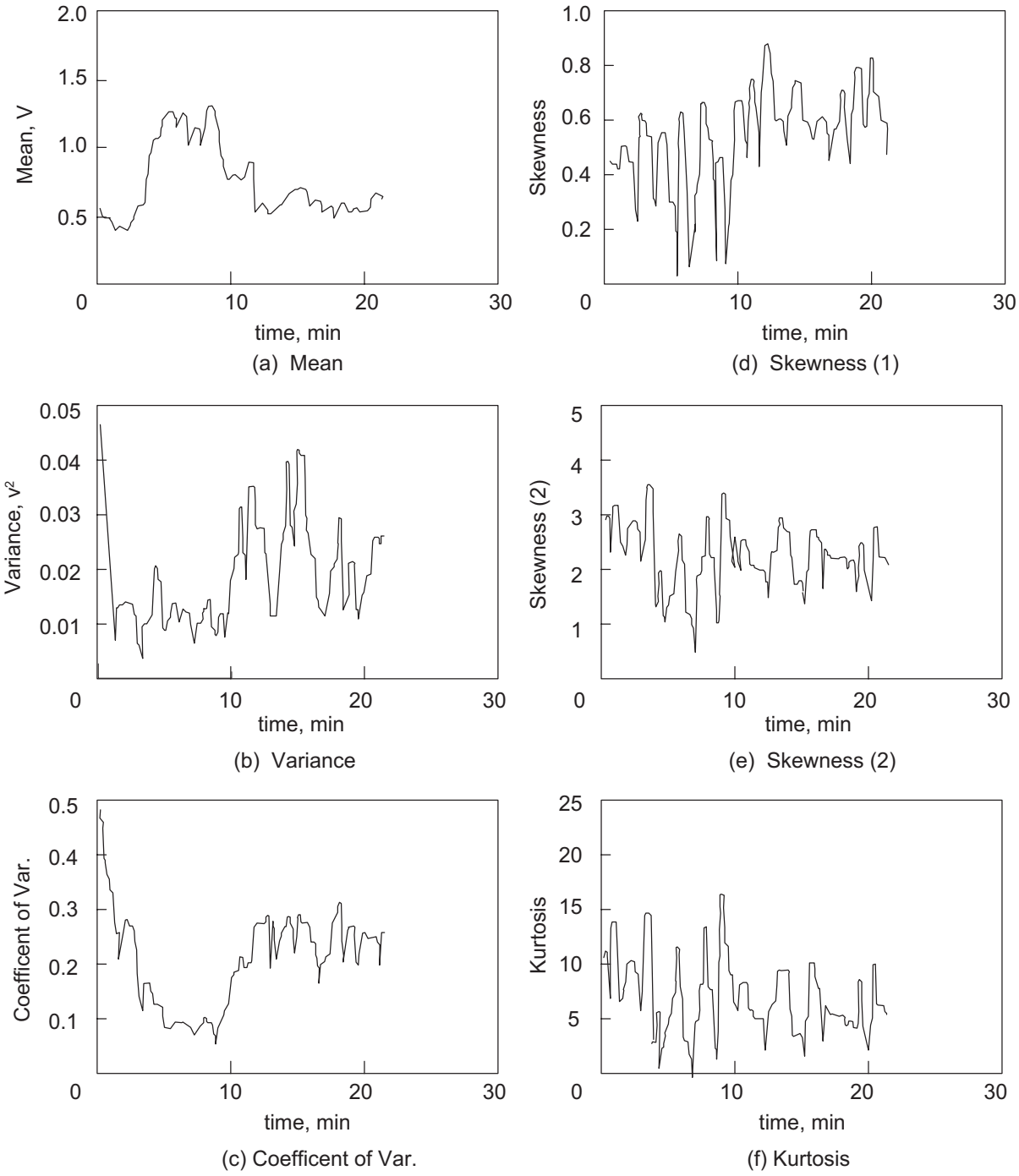
本研究では、ニューラルネットワークの処理ユニットにおける状態遷移関数にロジスティック関数を用いているため、ニューラルネットワークの出力値は、0 から 1 の間で連続値を取る。そこで工具の摩耗推定を行う際、0.8 以上の出力のみを評価の対象とした。表中、空白の箇所については、どの出力ユニットからも 0.8 以上の値が得られなかったことを意味する。

表より、定義した摩耗状態が移り変る遷移域において、出力が評価されずに空白の箇所が見られるが、全体に正しく所定の状態に分類されていることが分かる。

ここで用いたニューラルネットワークは、教師用のパターンが正しく準備されていなと学習を繰り返しても収束しない。すなわちひとつ入力パターンに、異なる理想出力を与えると、そのパターンに対して収束することができない。自己判別をある程度正確に行うことができたことは、教師パターン、すなわち入力と理想出力が正しく組み合わされていることを意味する。言い換えれば、ここで用いた統計量とすくい面上の摩耗量との間の関係が正しいことを意味する。

次に、学習によって得られたニューラルネットワークを用いて、図 3.17 に示した統計量から得られるパターンを用いて、工具の摩耗状態を推定した結果を表 3.3 に示す。表 3.3 より、切削を開始してから 6 分までは、ほぼ正確に推定が行えていることが確認できる。しかし、摩耗状態が移り変わるところ、および、すくい面の摩耗最大深さが $34\mu m$ のところで推定が正しく行えていない

ことがわかる。



Cutting speed $250m/min$ Depth of cut = 2.0 mm Feed rate = 0.38 mm/rev

図 3.21: Statistical values of AE signal plotted against cutting time.

つぎに、異なる切削条件における実験から求められた統計量を、先のネットワークの学習に加えて、再度ニューラルネットワークを形成した。実験の結果得られた統計量を図 3.21 に示す。また、学習後のネットワークを用いて再度、図 3.17 の実験に対して推定を行った結果を表 3.4 に示す。ここで、ひとつの入力パターンに対して、2 つ以上の結果が得られた場合には、大きな出力値を示す状態を左側に示している。

表 3.4 から、この場合も状態が移り変る箇所で必ずしも正しくない推定が行われていることが確認できる。しかし、表 3.3 に見られたように、完全に状態が移り変ったところで誤った推定を行うことはなくなり、正解率が向上する方向に学習が進んでいることが確認できる。

表 3.4: Estimated state of tool wear. (Application to unknown data) The data corresponds to the experimental results shown in Fig 3.17

sec						Maximum depth	sec						Maximum depth
	5	15	25	35	45	of		5	15	25	35	45	of
min						creator wear	min						creator wear
0	1	1	1	1	1	0.0	15	2	3	3	3	3	
1	1	1	1	1	1		16	3	1	31	3	1	20.0
2	1	1	1	1	1	2.0	17	31	13	13	1	1	
3	1	1	1	1	1		18	13	1	13	1	1	24.0
4	1	1	1	1	1	3.5	19	2	2	2	2	2	
5	1	1	1	1	1		20	3	3	3	3	3	
6	1	1	1	13	1	5.0	21	3	3	3	3	3	
7	1	31	3	1	3		22	2		3	3	3	
8	3	3	3	3	2	8.0	23	3	3	3	3		34.0
9		2	2	2			24	3	3	3	3	3	
10	2	2	2	2	2	10.0	25	3	3	3	3	3	
11	2	2	2	2	2		26	3	3	3	3	3	
12	2	2	2	2	2	11.0	27	3	3	3	3	3	
13	2	2	2	2	2		28	3	3	3	3	3	60.0
14	2	3	2			10.0							

Note: Numbers 1,2 and 3 corresponds to initial, middle and final state of tool wear respectively.

3.5 熱変形による加工誤差の推定と補正

情報処理技術の進歩により、それまでカムやクランクなどの機械的な機構やリレーなどの応用によるシーケンス的な制御による自動化に代り、中央演算装置 (CPU: central processing unit) に総称される数値的な計算機による自動化が押し進められている。当初はそれぞれの加工機に専用の数値制御装置を用いることで、加工に必要な演算の高速化や、安全のための信頼性を確保していたが、昨今ではこれらも汎用の計算機に置き換わりつつある。

また、このような動向に歩調を合わせ、それまで公開されていなかった工作機械の内部情報も明らかにされつつある [29]。そのため工作機械をシステムとして捕えた際の情報の流れを適切に把握することが可能になりつつあり、またより汎用的な情報処理装置や補助装置[注 3]をシステム要素として追加することにより、さらに高度な工作機械を構築することが可能と考えられる。

本節では、システムとしての工作機械に対し、汎用の計算機を上位情報処理を行うシステム要素として追加することにより、高度な情報処理に基づいた加工精度の向上を試みた結果についてまとめる。具体的には、工作機械の熱変形を取り上げ、工作機械の動作を加工中に修正することで、より高精度な加工を実現するための方法について整理する。

3.5.1 オープンアーティテクチャCNC

図 3.22: Apparatus of CNC Lathe

[注 3]たとえば、位置補正やクランプ力を動的に調整することのできる装置 [28] など

本研究で使用した汎用小型 CNC 旋盤の仕様および外観を図 3.22 に示す。この工作機械は、CNC に与えた動作命令すなわち NC プログラムに対して、補正動作の命令を与えることで、あらかじめ定めた動作に対して補正動作を行うことが可能な機能を持っている [30]。

図 3.23 に計算機から工作機械に与える動作命令の詳細を示す。計算機から工作機械に与える命令は、補正命令と従来の NC コマンドから構成される。工作機械の基本動作命令は、従来の手法と同様に加工前に工作機械に与えても、加工動作毎に与えてもどちらでも良い。一方、補正命令は、加工中に与え、その命令は 12.8msec を上限とする周期で工作機械が読み取る。そこで与えれられる動作命令は、現在の動作に反映され、工作機械の実際の動作になる。この動作は、基本的な命令はあらかじめ立案しておき、必要に応じてその動作を補償することになり、機械の動作を律する上で理解しやすい。

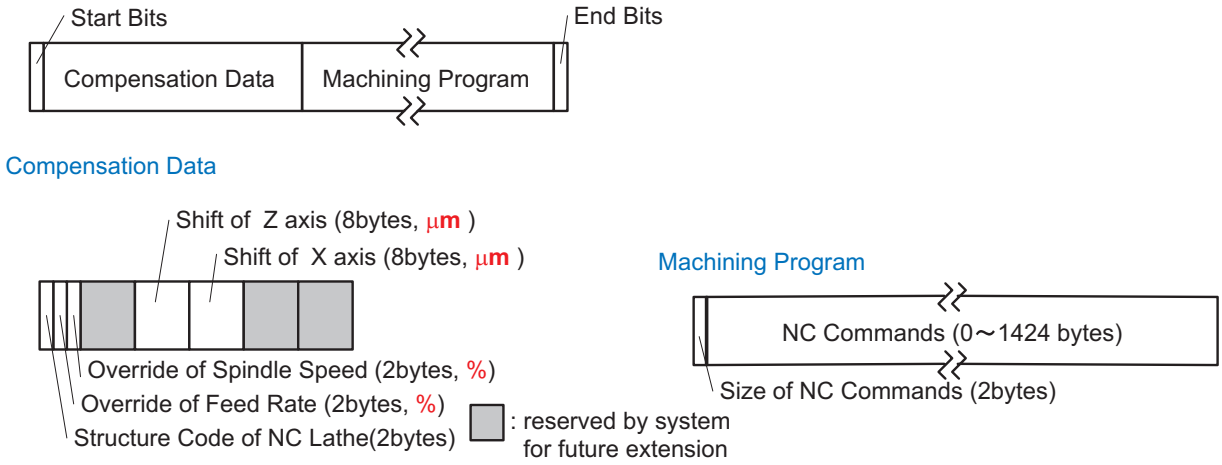


図 3.23: Details of information (computer to machine tool)

図 3.24 は、工作機械から計算機に渡される情報の内訳を示している。この情報には、工作機械が実行中の NC 命令の他、各駆動軸に関する状態が含まれている。ここに含まれていない情報については、前節で取り扱った AE センサや、本節で取り扱う温度センサなどの付加的なセンサによって状態を認識する必要がある。

これらの情報は、工作機械の CNC と計算機との間との間で TCP/IP(Transmission Control protocol/Internet Protocol) に従って交換される。

図 3.25 は、計算機と工作機械間で交換される情報を模式的に示している。すなわち計算機からは、まず基本となる動作命令が工作機械に与えられる。加工中の情報は、工作機械と機械に取りつけたセンサから獲得され計算機に送られる。その情報を分析し、工作機械の補正命令が計算機から工作機械に与える。これら一連の処理を繰り返し行うことで、状況に応じた高度な加工が可能になる。

3.5.2　工作機械の熱変形と熱変形予測モデル

工作機械の熱変形は、工作機械の設置場所、使用条件、機械の構造などさまざまな条件によりその挙動が異なる。たとえば、工作機械が設置される場所は特別な処置を施さない限り、工作機械周

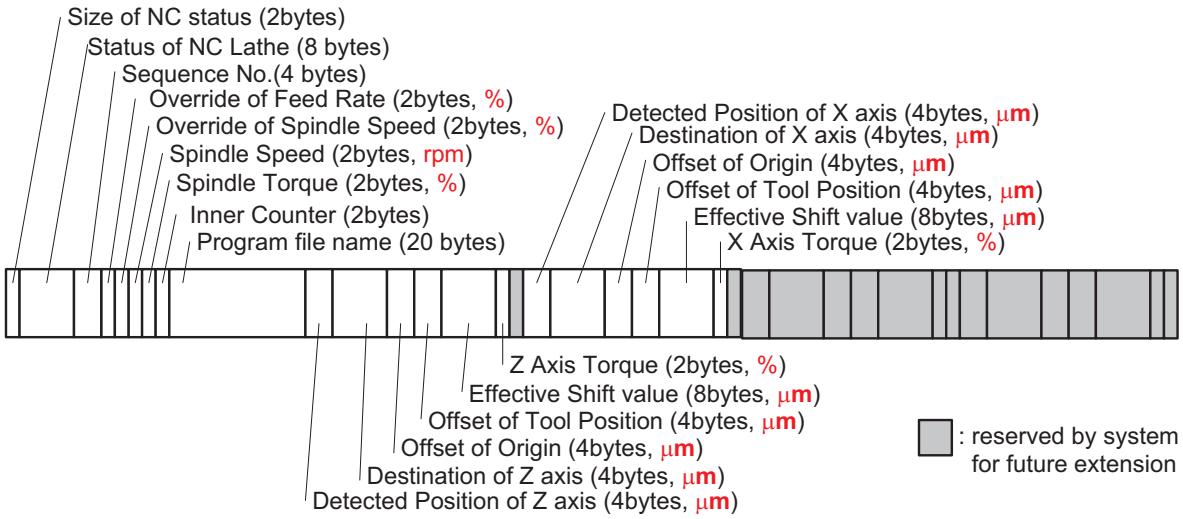


図 3.24: Details of information (machine tool to computer)

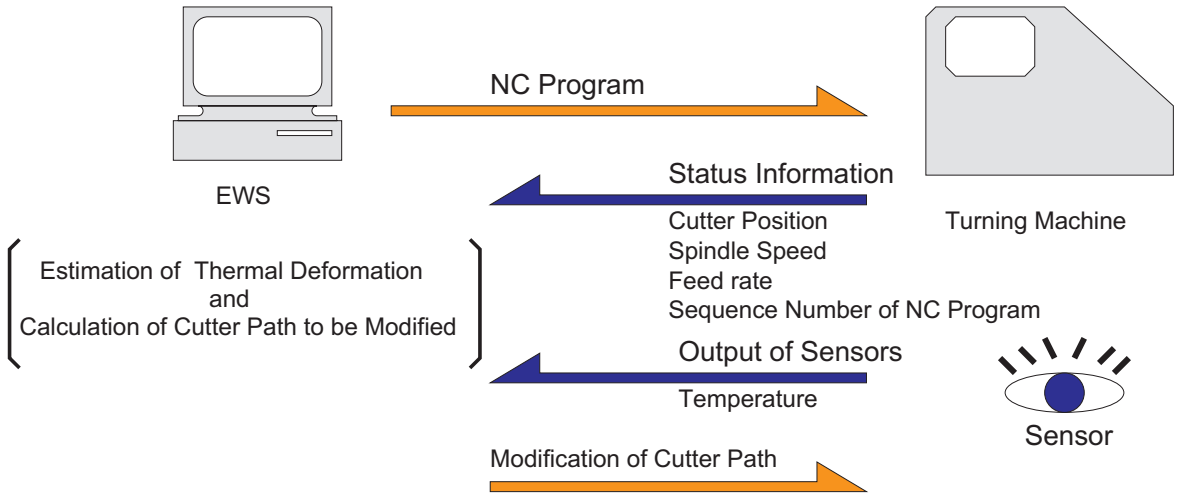


図 3.25: Control schema to compensate machining error

辺の温度は 1 日の中でも十数度の変化が生じ、それにより工作機械の各部材には熱変形が生じる。このような熱変形は長時間の加工が必要となる場合はもちろんのこと、要求される精度が厳しい場合などには、たとえ短時間で加工が終了するような場合においても問題になることがある [7] – [33]。このような環境の変化が工作機械が与える影響は、同一の工場内においても設置箇所や周囲の機械との関係によって異なるため、あらかじめ予測することは困難である。まして、加工条件や加工対象物の材質が異なる場合には、駆動源や加工箇所から発生する熱も異なるため、予測し対策を講じることは難しい。このように工作機械の熱変形が加工精度に与える影響をあらかじめ予測し対策を取ることは実際は不可能であり、加工中に状況に応じて対応をとることが必要と考えられる。

本研究では、このような理由から、状況に応じた行動を取ることができる工作機械の一例として、工作機械の熱変形を対象とした検討を取り上げる。また熱変形の中でも、工作機械を構成する部材の熱変形によって生じる加工点での工具と被削材間の相対変位を予測し、補正動作を行うことを検討する。

加工点の変形は、工作機械の代表的な点な箇所の熱変形によって生じる加工点の相対変位の重ねあわせによって生じると考える。すなわち次式によって表現される。

$$Z = z_0 + z_1 + \cdots + z_i + \cdots + z_{n-2} + z_{n-1}$$

ここで、Z は、加工点における Z 軸方向の工具と被削材間の相対変位量を表すものとする。また、z_i は、工作機械の代表的な i 番目の測定点に生じた工作機械構造部材の熱変形に起因して、加工点に生じた工具と被削材間の相対変位量を表している。

z_i は、i 番目の代表点の温度を測定することによって推定する。ここでは、測定点における温度変化の履歴を考慮し、温度変化の時系列情報から推定を行う。いわゆる時系列予測を行うことになり、z_i は、次式で表現することが可能である。

$$z_i(t) = a_{i0}Ti(t) + a_{i1}Ti(t - dt) + \cdots + a_{ij}Ti(t - j \times dt) + \cdots$$

ここで、a_{ij} は適当に定められる係数であり、本研究では、実験によって測定される温度変化情報と工具-被削材の相対変位情報から、推定誤差が最小になるような係数を同定する。その際、最小自乗法を利用する。なお、送り方向の熱変形や、マシンニングセンタのように他の構成軸を持つ場合にも同様のことが言える。

3.5.3　実験条件および実験方法

図 3.26 に、工作機械上の温度変化の測定点を示す。測定点は、熱変形の原因となる発熱源に近い箇所、およびその部材が変形することにより加工点での相対変位に影響を与える箇所を選定している。主な測定を表 3.5 に示す。

z 軸稼働の摩擦熱が熱変形に与える影響を調べるために行った実験の主な手順は次のとおりである。

z 軸方向に工具刃物台を往復運動させて z 軸稼働部の摩擦熱を発生させ、温度と熱変形量を測定する。工作機械への電源投入による影響を除去するために、電源投入後に熱的な平行状態になっていることを確認する。また、工作機械が設置してある箇所の周囲気温は一定に保つように工夫する。工具刃物台を送り速度 $5m/min$、$10m/min$ および $20m/min$ の 3 条件で z 軸方向に 90 分間の間駆動させ、駆動終了後 3 時間そのまま放置した。温度と工具- 被削材間の相対距離の測定は 1 分毎に行なう。測定から次の測定までの 1 分のうち、30 秒間は往復運動を行い、のこりの 30 秒は測定のため運動を停止させる。なお、z 軸方向の稼働範囲が $200mm$ であるため、30 秒間での運動は、5 m/min の場合 3 往復、$10m/min$ および $20/min$ の送り速度の場合はそれぞれ、6 往復および 13 往復である。これらの実験は再現性を確認するために 3 回づつ行なう。

3.5.4　実験結果および熱変形補正結果

図 3.27 に、代表的な測定点における温度変化と、その時に加工点に生じる工具と被削材間の相対変位の測定結果を示す。図から、送り台の運動とともに各測定点の温度が上昇することが確認で

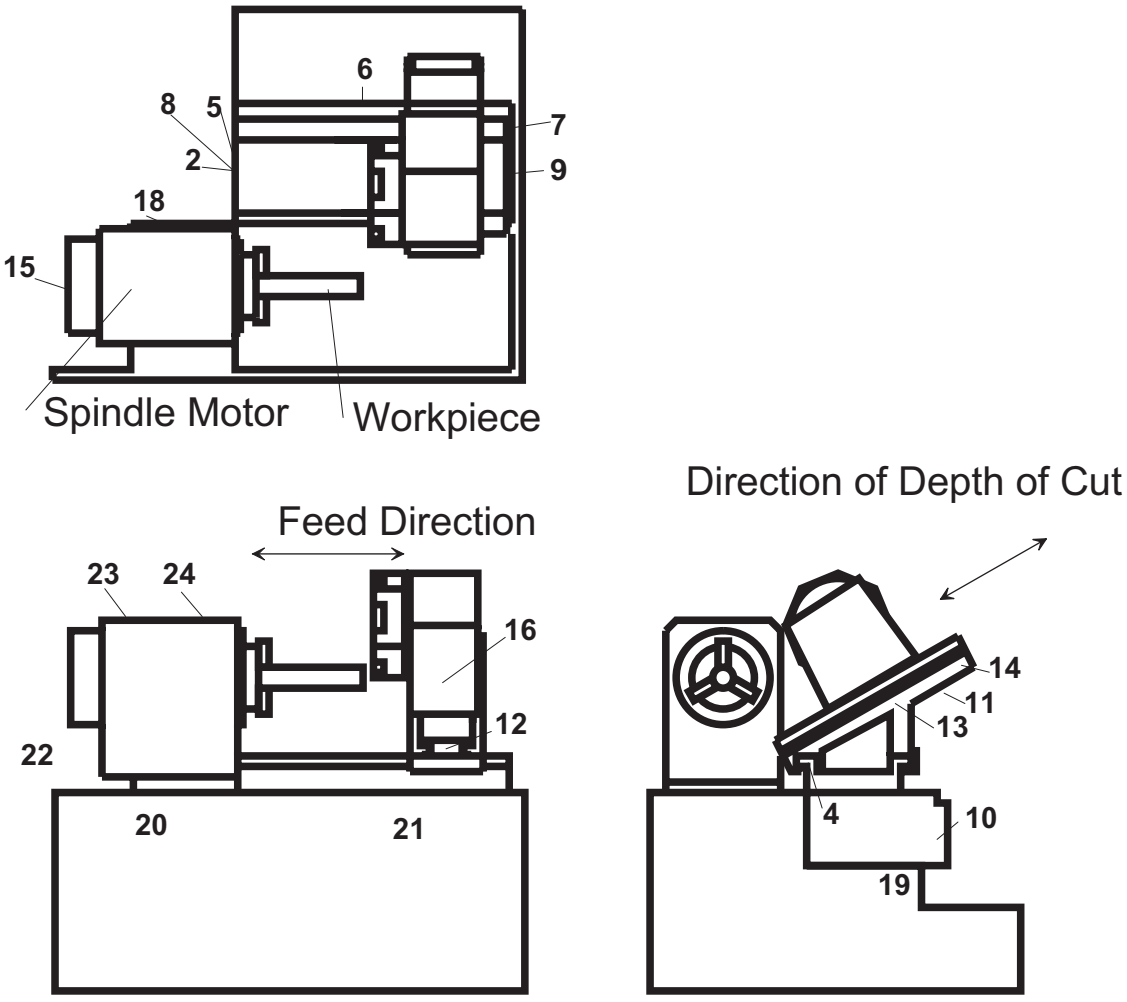


図 3.26: Point of temperature measurement

き、その割合は、ほぼ送り速度に比例していることが確認できる。しかしながら、温度変化の様子は、1 次遅れの様相示しており、稼働時間と単純な比例関係を持たないことが確認できる。

一方、工具と被削材間の相対変位にも、工作機械上の温度変化の測定結果とほぼ同様の傾向を示していることが確認できる。

図 3.28 は、個々の測定点の温度の時系列情報を用いて、それぞれの温度変化が工具と被削材間の相対変位に与える影響を推定し、さらにそれらの結果を重ねあわせることにより、最終的な工具と被削材の相対変位量を推定した結果である。

図から推定をほぼ正しく行うことができており、加工点に生じる加工誤差を推定できることが確認できる。

図 3.29 に、実際に加工実験を行い、加工中に推定される加工誤差を補正した結果を示す。実験の結果は、触針式の粗さ計により加工面の形状を測定することにより評価した。

加工補正実験は、被削材端面を 3 回に分けて加工し、それぞれの加工間に送り台を往復運動させることにより、工作機械の熱変形を誘発し、その影響を調べた。実験の結果から補正加工を行わな

表 3.5: Experimental condition

場所	熱源
周囲気温	
工具刃先近傍の気温	
z 軸摺動面	摩擦熱
z 軸摺ボールネジブラケット	摩擦熱
z 軸モータ	モータの発熱
油圧チャック用油タンク	回収した熱の蓄熱
主軸冷却水	主軸モータの発熱
主軸モータカバー	主軸モータの発熱
x 軸摺動面	摩擦熱

い場合には、$75\mu m$ 以上ある加工誤差が、$25\mu m$ 以下にまで減少していることが確認できる。

この結果から、工作機械の熱変形を対象として、加工中に状況に応じた行動を取ることが可能な工作機械の構築が実現できていることが確認できる。

3.6　結言

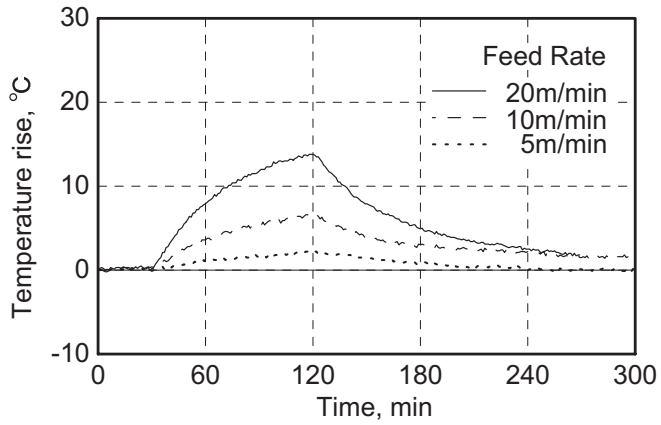
本章では、工作機械を複数の装置からなるシステムとして捕えることの妥当性と意義について述べ、工作機械に対して新たなシステム要素を追加することによるシステムの論理構造の変化について整理した。また実際に、高度な情報処理装置が可能な情報処理装置を追加し、開発された工作機械の有効性を確認した。

本章で得られた成果は以下のように要約される。

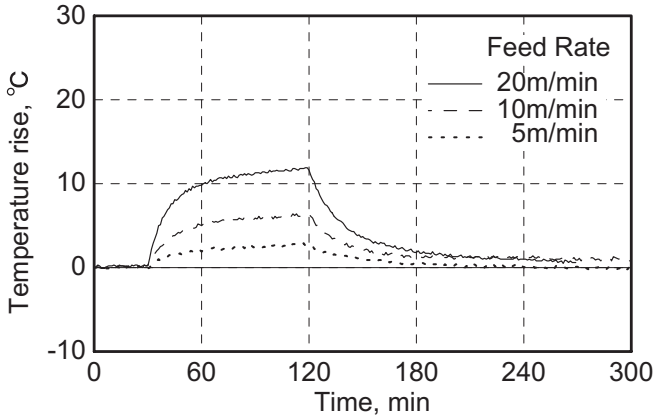
1　工作機械をシステムとして捕えることの妥当性とその意義について整理した。また工作機械内での情報の流れと物の流れに着目し、工作機械の内部構造の整理を行った。この際、時間的な処理を考慮にいれより詳細な分析を行った。また高度な情報処理を行う計算機と位置づけを明確にし、工作機械の論理的な構造の違いについて、工作機械をシステム要素として捕える場合と、システムとして捕える場合の差異を明確にした。

2　コーティング工具の摩耗による損耗箇所の材料変化に着目し、AE を利用した摩耗検出方法の提案を行った。情報処理の手法として学習と呼ぶことが可能な処理を行うことが可能なニューラルネットワークを採用し、実行する加工条件の追加により摩耗推定精度が向上することを示した。

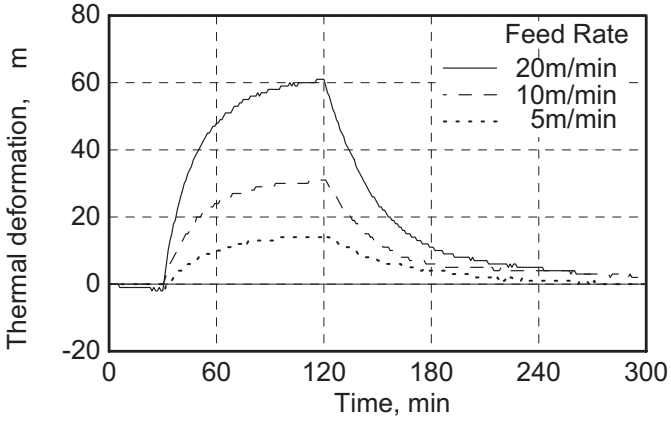
3　工作機械の熱変形を対象に、工作機械の動作補償の構築例を示した。構築した工作機械はオープンアーキテクチャCNC を搭載した小型 CNC 旋盤と EWS を利用した。適切な条件により工作機械の熱変形に対する特性を内部モデルとして構築することにより、高精度な加工が行えることを示した。



(a) Temperature Rise at Z Axis Motor Cover



(b) Temperature Rise at End Bracket of Z Axis Ball Screw



(c) Thermal Deformation in Z Direction at Cutting Point

図 3.27: Examples of temperature rise measured at representative point and thermal deformation in Z direction

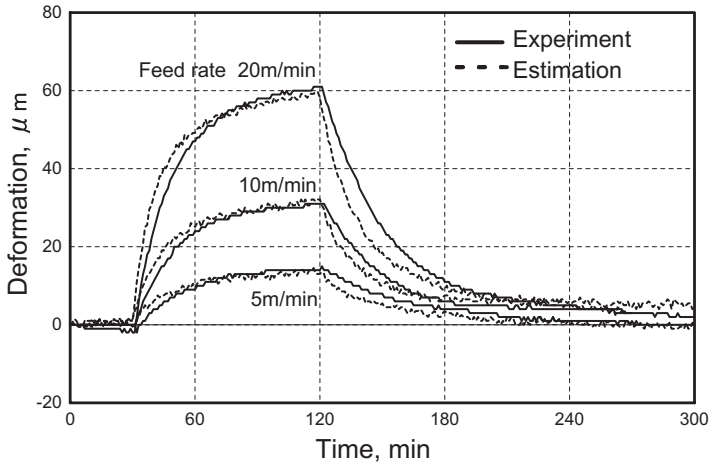


図 3.28: Comparison between estimation and experiment in Z direction

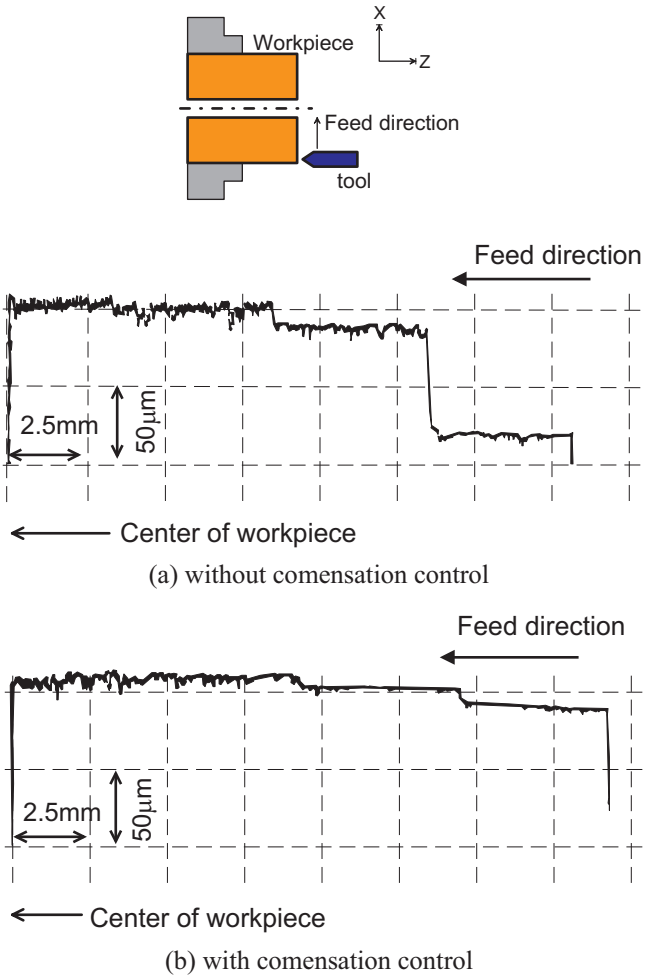


図 3.29: Example of compensation control

参考文献

[1] Toshimichi MORIWAKI, Eiji SHAMOTO, Rei HINO, Modeling and Monitoring of Milling Process for Intelligent Control of Machine Tool, Proceedings of the 3rd CIRP Workshop on Design and Implementation of Intelligent Manufacturing Systems, pp184-192, 1996

[2] TOSHIMICHI Moriwaki and REI Hino, Application of Neural Network to AE Signal Processing for Automatic Detection of Cutting Tool Life, Proceedings of the First International Conference on Automation Technology, pp811-818, 1990

[3] 森脇俊道，樋野励, AE を用いたコーティング工具の寿命検出に関する研究, 精密工学会誌, Vol.57, No.7, pp1259-1264, 1991

[4] 中上隆三, 正本和則, AE センサの工作機械への応用, マシニスト, Vol.25, No.3, p58, 1981

[5] 酒井義郎, 友貞賢二, 切削加工における状態監視システムについて日本機械学会論文集 (C 編）, Vol.53, N485, p255, 1987

[6] 青山英樹, 岸波建史, 斎藤勝政, 逃げ面摩耗量検出センサ内蔵型スローアウェイ工具の開発精密工学会誌, Vol.54, No.4,p80, 1988

[7] 山品元, 奥村進, 細江三弥, 岡村健二郎, オートフォーカス機構を組み込んだ光計測による非接触工具損傷モニタリング装置の開発精密工学会誌, Vol.55, No.8, p73, 1989

[8] 仁科健治, 力センサを利用した工具摩耗、損傷のセンシング, 機械と工具, No.2, 1989

[9] 清水勇芳, AE センサによる微小振動の測定, センサ技術, Vol.7, No.5, 1987

[10] 湯山茂徳, 圧電型 AE センサの原理と超小型センサの適用例, センサ技術, Vol.7, No.11, p42, 1987

[11] 小島浩二, 稲崎一郎, 三宅亮一, アコースティックエミッションを利用した旋削プロセスの監視, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.52, No.474, p799, 1986

[12] 吉村喜代和, 刃物折損用 AE センサ, センサ技術, Vol.7, No.11, p49, 1987

[13] 垣野義昭, 藤原彰彦, 端谷道明, 工具の熱亀裂の検出法, センサ技術, Vol.9, No.3, p53, 1989

[14] K.Iwata, T.Moriwaki, An Application of Acoustic Emission Measurement to In-Process Sensing of Tool Wear, Annals of CIRP, 25, 1, p21. 1977

[15] Kannatey-Asibu, E., Jr., Dornfeld, D.A., Quantitative Relationships for Acoustic Emission from Orthogonal Metal Cutting, Trans. ASME J.Eng.ind., Vol.103, No.3, p330, 1981

[16] M.S.Lan and D.A.Dornfeld, Experimental Studies of Tool Wear via Acoustic Emission Analysis Proc. 10th NAMRC, McMaster University Hamilton, Ontario. May. 1982

[17] 甘利俊一, 神経回路網の数理・脳の情報処理様式,

[18] 安西祐一郎, 岩波講座 ソフトウェア科学 16 認識と学習

[19] 麻生秀樹, ニューラルネットワーク情報処理産業図書

[20] D. E. Rumelhart, G. E. Hinton, R. J. Williams, Learning Internal Representation by Error Propagation, A Bradford Book, MIT Press, Bambridge, MA & London, pp318-362, 1986

[21] T.Moriwaki, M.Tobito, A New Approach to Automatic Detection of Coated Tool Based on Acoustic Emission Measurement, Sensors and Controls for Manufacturing, Presented at The Winte Meeting of the ASME, PED-Vol.33, pp75-82, 1988

[22] Altintas, Y., Prediction of Cutting Forces and Tool Breakage in Milling from Feed Drive Current Measurements, ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 114, 386-392, 1992

[23] Okuma Co., OSP7000L User's Manual, Vol.1, 1996

[24] Bryan, J., International Status of Thermal Error Research, Annals of the CIRP, Vol.39, No2, 645-656, 1988,

[25] Dornfeld, D. A., 1990, Neural Network Sensor Fusion for Tool Condition and Control, Annals of the SIRP, Vol. 39, No. 1, 101-105, 1990.

[26] Mitsuishi, M. and Nagao, T. et al., An Open Architecture CNC CAD-CAM Machining System with Data-Base Sharing and Mutual Information Feedback, Annals of the CIRP Vol. 46, 269-274, 1997

[27] 森脇俊道, 樋野励, AE を用いたコーティング工具の寿命検出に関する研究, 精密工学会誌, Vol. 57, No.7, pp1259-1264, 1991

[28] Toshimichi MORIWAKI, Eiji SHAMOTO, Rei HINO, Jer-Wen CHEN, Development of Work Clamping System Equipped with Force Sensors and Actuators, Proceedings of the Fourth International Conference on Automation Technology, pp489-494, 1996

[29] Yamazaki, K. Hanaki, Y. et al., Autonomously Proficient CNC Controller for High Performance Machine Tools Based on an Open Architecture Concept, Annals of the CIRP, Vol. 46, 275-278, 1997

[30] 数値制御装置 OSP700L(LCS15H) 取扱説明書 (第 1 版), オークマ株式会社 電装事業部, 1996.

[31] Moriwaki, T. and Zhao, C., Neural Network Approach to Identify Thermal Deformation of Machining Center, Proceedings of 8th International IFIP WG5.3 Conference, PROLAMAT'92, pp685-697, 1992

[32] Moriwaki, T., Intelligent Machine Tool: Perspective and Themes for Future Development, Manufacturing Science and Engineering Volume 2, ASME, Vol., 68-2, 841-849, 1994

[33] 森脇俊道, 社本英二, 河野昌弘, ニューラルネットワークによる工作機械の熱変形予測 (機械表面温度の時間履歴を考慮することによる予測制度の向上), 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.61, No584, pp1691-16-96, 1995

第4章　システム要素としての工作機械

4.1　緒言

工作機械をはじめとする生産設備は、いうまでもなく生産システムを構成する極めて重要な生産設備のひとつである。また工場を生産システムとして、機械を工場を成立させるためのシステム要素として捕える認識は一般的なものであり、さまざまな形態のシステムが提案され、一部は実際に運用されている。

本章では、多品種少量生産あるいは変種変量生産に適している生産システムとして、自律分散型の生産システムを対象とし、システム要素としての機械が行う動作について検討した結果についてまとめる。ただし、ここでは自律とは何かということについては触れず、第2章で考察した自律との関係については言及しない。

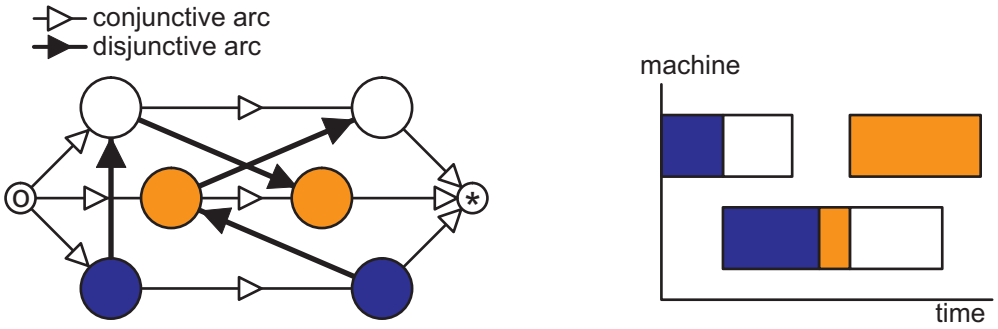
自律分散型生産システムにおいて、個々の機械が行うべき動作は生産活動である製造の他に、機械同士を互いに関連づけるための情報処理があげられる。中でも工程設計とスケジューリングは、代表的な課題として取り上げることができる。ただし本章では、工程設計についてはスケジューリングとの関係を述べるにとどめ、具体的な処理方法については触れない。本章では、著者が提案する機械間で利用される情報交換を中心に、自律分散型のシステムの運営方法について詳述する。

4.1.1　スケジューリング問題と工程設計

生産システムの運営方法を考える場合、システムの最適化に関する問題は大きく2つに分類することができる。ひとつは工程設計 (process planning) であり、もうひとつはスケジューリング (scheduling) である。ここでいう工程設計とは、保有する機械の能力と利用可能な時間に基づいて、製品を製造するための工程 (process) を決定する行為を指し、この工程計画の結果、使用する機械と処理時間が決定される。他方、スケジューリングとは、工程設計によって機械に割り当てられた複数の作業 (operations) の処理順序を決める行為を指す。この工程設計とスケジューリングの問題は、個々のシステム要素の間に依存関係がある最適化問題であると同時に、これら2つの最適化問題も互いに依存関係に、どちらか一方が決まらないと他方を最適にすることができない。

工程設計とスケジューリング問題を同時に取り扱うことも可能であるが、本章では、工程設計はすでに終わっていることを前提に、スケジューリング問題を個々の機械の自律分散的な処理によって取り扱う方法について述べる。

図 4.1 は、スケジュールの代表的な表現方法を2機械3製品のスケジューリング問題を対象に示している。図 4.1(a) は、スケジュールの離接グラフを用いた表現を、また図 4.1(b) は、機械について整理したガントチャートによる表示例を示している。離接グラフによるスケジュールの表示例からは、それぞれの機械の関係はひとつの製品の工程を介して関係づけられている様子が理解できる。この関係は、第2章で取り扱った物の流れに相当するものである。機械間の関係は、工程計



(a) Disjunctive graph representation (b) Gantt chart representation

図 4.1: Schedule in a shop with two machines and three products

画によって決められ、個々の機械の動作計画はスケジューリングに従って決められることが理解できる。一方、ガントチャートによる表現は、機械の稼働状態と個々の機械の依存関係を視覚的に理解する上で便利である。本研究では、離接グラフによって導かれる機械間の関係を前提に、主としてガントチャートによる表現を用いて議論を進める。

4.1.2 分散管理とスケジューリング

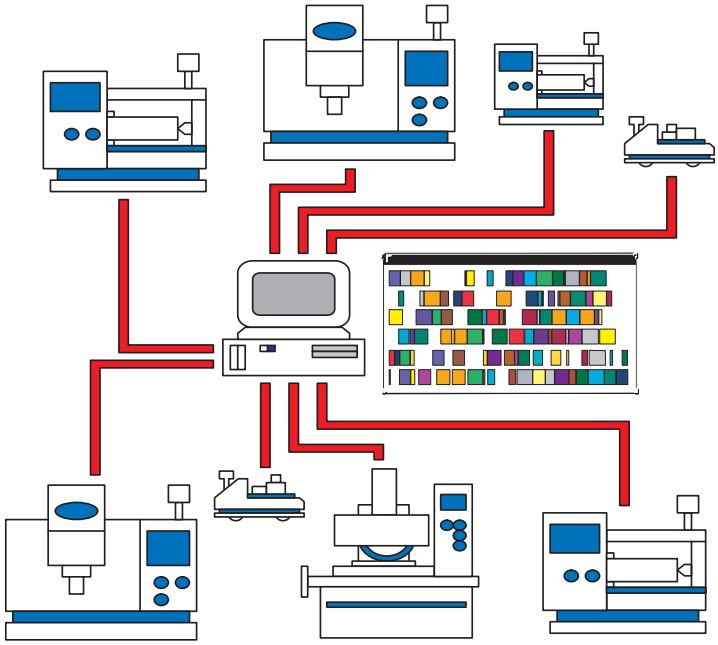
システムを構成する要素を分散的に管理することは、システムを取り巻く環境の変化に対する柔軟性やシステム要素の部分的な状態の変化に対する頑強性に加え、システムの保守を容易にするための有効な手段として認識されている。こうしたシステム要素の分散管理の研究は、計算機の分野に始まり [1][2]、生産の分野に至るまで広い領域で行われている。

一方、スケジュールの立案は、生産活動を行う上で極めて重要な行為であり、古くからさまざまな条件の下で研究が行われている [3] – [6]。スケジューリングに対する関心は現在でも薄れることなく、特に最近では、多品種少量生産、あるいは変種変量生産を前提としたスケジューリング問題が注目されている。このような生産形態を対象にした場合、取り扱う情報が多岐にわたり、手続きが複雑になるため、情報の管理と処理を機械ごとに行う分散型のスケジューリング手法が有効であると指摘されている [7][8]。

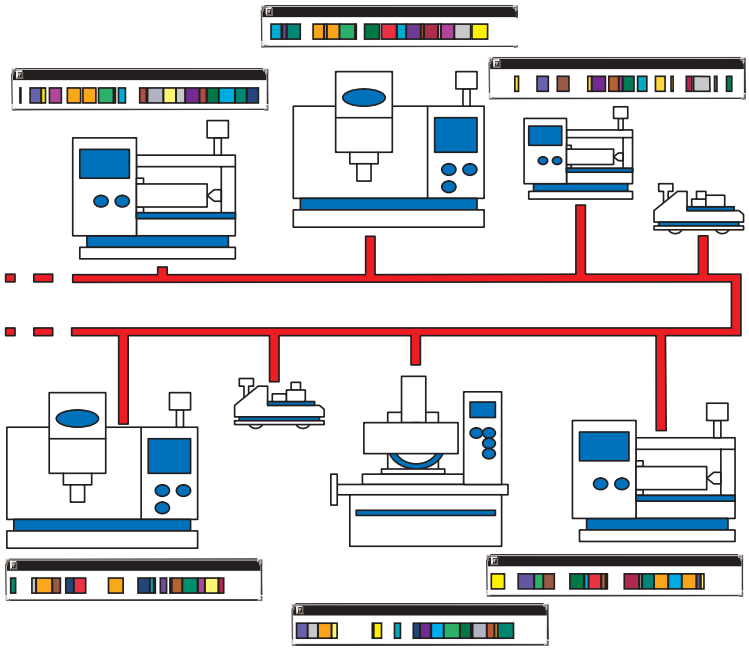
図 4.2 は、各機械が行う作業の処理順序を集中的に管理している様子と、それぞれの機械が自らの作業の処理順序を独自に立案している様子をそれぞれ模式的に示している。

従来の研究では、将来の製造計画を持たずに、機械が担当する作業をそのつど選択するいわゆる作業割り当てに関する検討が行われている。そのため、作業の割り当て時にスケジュールの最適性をある程度保証するような工夫や、割り当て時の規則を機械が動的に獲得するための手法の提案が行われている [9] – [11]。機械がスケジュールを持たないことで、機械の故障に対するシステムの頑強性の他に、新しい機械の追加や特急仕事への対応などの柔軟性が期待できる。

ところで、機械が将来の製造計画を決めている場合でも、状況の変化に応じてスケジュールの変更を行なうことにより、分散型生産システムの特徴である頑強性や柔軟性などの効果が期待できる。また、作業をそれぞれの機械に割り当てた後に、部分的なスケジュールの改善を行った方が、時々刻々の状況に適したより良いスケジュールを得ることができる可能性がある。



(a) Centralized manufacturing system



(b) Decentralized manufacturing system

図 4.2: Structure of manufacturing system

しかし、一般にスケジュールの対象となる作業は、他の機械によって処理される作業との間に先行順序などの依存関係がある。そこで、すでに決められたスケジュールの変更を行う場合には、他の機械が行う作業の処理時刻との整合性を保証する必要がある。また、変更を行う際に、機械独

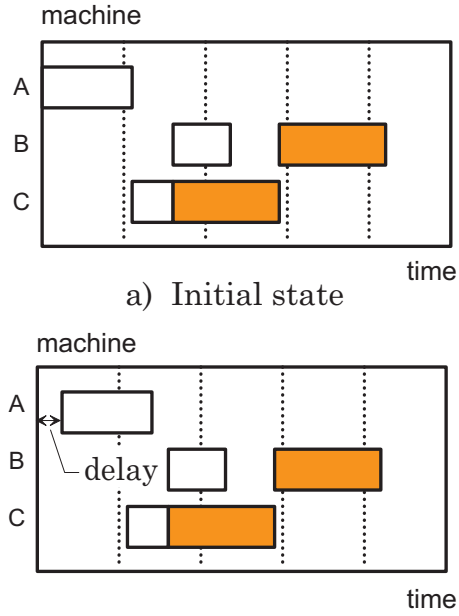


図 4.3: Adjustment of schedule among three machines

自の判断に基づいていたのでは、システム全体の状態を常に改善できるとは限らない。そのため、各々の機械は、自分が行った変更によりシステム全体のスケジュールに生じる影響を定量的に評価することができなくてはならない。

図 4.3 は、3 台の機械によって処理される 2 製品のスケジュールのガントチャートを示している。ここで図 4.3(b) に示されるように、機械 A が自分が処理する作業の開始時刻を一定時間だけ遅らせた状況を想定する。他の機械は、機械 A の変更に対して、それぞれが管理する作業の開始時刻を調整し、図 4.3(c) に示される状態にスケジュールを修正する必要がある。

このとき、機械 C は、機械 A が第 1 作業の開始時刻を変更し、次の機械に渡す時刻が変更されたことを伝えられれば、自らのスケジュールの変更は可能である。なぜならば、後続の機械は、機械 C に他ならないからである。しかし機械 B は、それだけの情報では、自らのスケジュールの修

正を行うことはできない。機械 B にとって、第 1 作業が機械 A が変更した作業に関連があることから、第 1 作業の処理時刻に変更が必要になることは予測できても、時刻の調整を行うことはできない。また機械 B の第 2 作業については、変更の予測すら行うことができない。

このように、機械が変更を行う場合には、単純に変更の事実を同じ場に存在する機械に伝えるだけでは不十分なだけではなく、間接的に変更が必要な作業の処理時刻の変更を含めて、順序良く通知する必要がある。また、各機械が変更を独立に行うことはできず、変更を行った場合には他の機械に与える影響を定量的に把握する必要がある。たとえば、図 4.3 の場合、機械 A が第 1 作業の開始時刻を Δt だけ変更すると、システム全体では、機械 A 自身の変化も含めて全体で $\Delta t \times 3$ の遊休時間の増加が生じる。

このように、自律分散型生産システムにおいては、機械は自らの変更を必要な機械に順序よく伝える必要があると同時に、システム全体に生じた変更を定量的に把握する必要がある。言い換えれば、この 2 つの要求を満たすことが可能な場合、各機械は自らに割り当てられた作業の処理順序を適切に変更することで、システムの稼働率を好ましい状態に変更することが可能になる。

本章では、分散的に管理された機械がスケジュールの改善を行うために用いる再帰的伝播法と名付けた情報交換方法の提案を行う。ここでは、ジョブショップスケジューリング問題を対象に、計算機シミュレーションによりその有効性を検証する。

4.2　ジョブショップスケジューリング問題

4.2.1　用語の説明

スケジューリング問題は、製品を作るために必要な工程の順序があらかじめ既知である場合に、機械が割り当てられた作業に関して処理順序を決定する問題である。このとき、製品を作るための工程は、機械が行う作業と 1 対 1 の関係にある。そこで、本論文では、スケジュールの基本要素である仕事（job）を、製品（product）の立場から捕らえた場合には工程（process）と呼び、機械（machine）の立場からとらえた場合には作業（operation) と呼ぶことにする。

ここで、使用する記号の意味は以下の通りである。

$j_{\eta,i}^{\zeta,v}$:　機械 ζ が v 番目に処理を行う作業。また、
　　製品 η を製造するための i 番目の工程。
s :　仕事 j の処理開始時刻 (starting time)
f :　仕事 j の処理終了時刻 (finishing time)
p :　仕事 j の処理時間 (processing time)
r :　仕事 j の搬出あるいは搬入時刻 (release time)
$\hat{s}, \hat{f}, \hat{r}$:変更後の諸時刻

また、機械が行う情報交換の手順は、片言 ALGOL (Pidgin ALGOL) [12] を用いて記述する。その内、本研究で機械が用いる情報の送信、および受信を表現する記述は、以下の通りである。

Send(a,b)　　a: 発信情報、 b: 受信先の機械名
Receive(a,b)　a: 受信情報、 b: 発信元の機械名

その他の機械の動作を判断するための条件分岐の記述法は、一般的な高級プログラミング言語と同じであるため説明は省略する。

4.2.2 前提条件

ジョブショップスケジューリング問題は、複数の製品を複数の機械を用いて製造する場合のスケジュールを決定する問題であり、製造のために使用する機械の順序が製品ごとに異なる点に特徴を有する。一般に分散型の生産システムにおいては、製品の加工順序よって決められる機械間の関係が状況に応じて変化すると考えられる。そのため、ジョブショップスケジューリング問題は、分散型生産システムを考察する上で、重要かつ基本的な課題であると判断している。本研究で対象とするジョブショップスケジューリング問題に、次の前提条件を置く。

前提条件１：
(1) 技術的順序は既知
(2) 各工程に要する作業時間は既知
(3) 機械が行う作業は 1 度に 1 つ

一般にジョブショップスケジューリング問題では、工場内に仕事が投入されてから最後の作業が終了するまでの時間、すなわち総所要時間（makespan）を評価値に用いることが多い。しかし、この指標は工場内で最後に作業を終了する機械を特定する必要がある。本研究では、システム全体を監視するような集中管理機構の存在を仮定しておらず、また個々の機械も他のすべての機械の状態を把握できないと考えている。そのため、総所要時間を用いた評価値は、ここで対象とする分散型システムの前提に適していない。そこで本研究では、仕事が投入されてから、個々の機械が自分に割り当てられたすべての作業を終了するまでの時間に着目し、これらの時間の総和を最適性を評価する上での指標とする。この場合個々の機械のスケジュールに対する行動を評価するためには、かならずしも総和値を対象にする必要はなく、総和値に対する変化量を考慮すれば良い。

評価値：個々の機械が作業を終了するまでの時間の総和値の変化量。

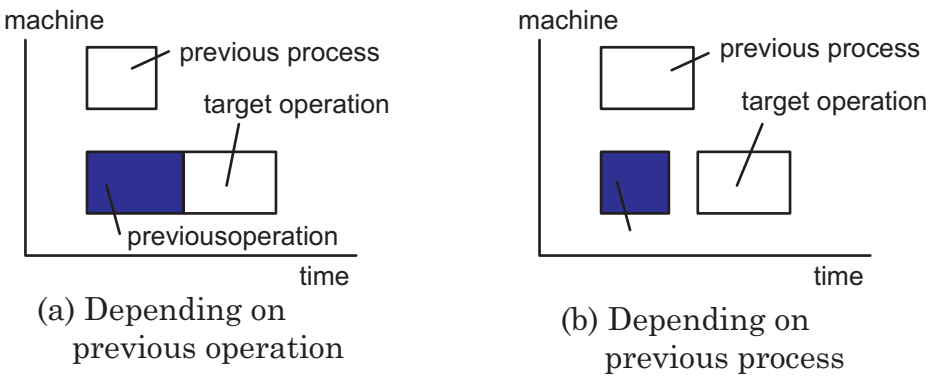


図 4.4: Decision of starting time of operation

図 4.4 に、作業の開始時刻を決める際の制約をガントチャートを用いて模式的に示す。着目する作業の開始時刻は、同じ機械上の先行する作業の終了時刻か、別の機械で処理される同一製品の先行する工程の終了時刻のいずれか遅い方の時刻に従って決められる。図 4.4 (a) に先行する作業の終了時刻が制約になる場合を、また 4.4 (b) に先行する工程の終了時刻が制約になる場合をそれぞれ示す。

4.3　再帰的伝播法による機械間の情報交換

4.3.1　再帰的伝播法

本研究では、すでに得られているスケジュールに対して、機械は自分が担当する作業の処理順序を変えることにより、システム全体のスケジュールを改善することを考える。そのため最初に実行可能なスケジュールが得られていることが前提になる。ただし初期のスケジュールには最適性を全く必要としないため、集中管理機構の介在を必要とせずに割り当てが可能であると仮定する。

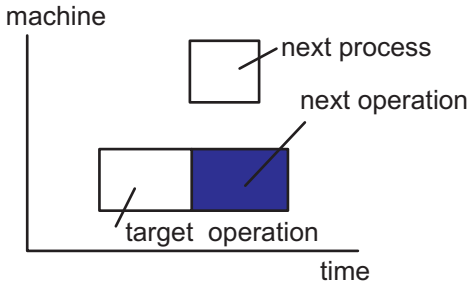


図 4.5: Influence of change of starting time

図 4.5 に着目する作業と、その作業の処理時刻が変更された場合に直接影響を受ける作業および工程の関係を模式的に示す。作業の処理開始時刻は、同一機械によって処理される先行する作業の終了時刻か、あるいは他の機械によって処理される同一製品のための先行する工程の終了時刻のいずれか遅い方の時刻である。言い換えれば、作業の処理開始時刻を変更した場合には、同一機械によって処理される後続の作業の開始時刻か、あるいは他の機械によって処理される同一製品の後続の工程の開始時刻に影響を与えることになる。本研究では、このことに着目し、作業の処理時刻を変更した場合に、直接影響を与える作業の処理を受け持つ機械とのみ情報交換をすることを考える。間接的に影響を与える機械については、その機械に直接影響を与える機械に情報を委託する。

このように、機械が情報を伝達する対象を、現在着目している作業の前後の工程を処理する機械とし、情報交換を行う方法について検討する。提案する方法は、情報伝達の手順が再帰的に記述されることから、再帰的伝播法（recursive propagation）と名づける。

提案する手法を用いて機械が行う動作は、作業処理時刻の ”変更 ”、その変更の ”通知 ”、および変更に対する ”報告 ”の 3 つである。変更はスケジュールの改善と、他の作業の処理時刻の変更に対してスケジュールの整合性を保つために行われる。また通知は、変更を行った場合に、他の機械に影響を与える可能性がある場合に行われる。ただし通知は、着目する作業の次工程を処理する機械に対してのみ行われる。報告は必要な処理がすべて終了した場合に、通知を行ってきた機械に対して行う。このとき報告を行う機械が、すでに他の機械から報告を受けている場合には、その結果も合わせて報告を行う。

4.3.2　情報交換手順

生産システム内の機械は、常に他の機械からのメッセージが送られてくるのを待っているものとする。通知を受け取ってから報告を行うまでの、再帰的伝播法による情報交換の手順を以下に

示す。

Step 1: 他の機械からメッセージが送られてくるのを待つ。メッセージを受け取った機械を ζ、送信元の機械を ξ とする。受け取ったメッセージが変更に関する通知の場合、通知のメッセージに続いて、機械 ζ は、自分が v 番目に行う作業 $j_{\eta,i}^{\zeta,v}$ の変更後の搬入時刻 $\hat{r}_{\eta,i}^{\zeta,v}$ に関する情報を受け取る。受け取った時刻と、その作業の直前に処理を行う作業 $j_{\nu,j}^{\zeta,v-1}$ の終了時刻 $f_{\nu,j}^{\zeta,v-1}$ のうち、遅い方の時刻をその作業の処理開始時刻とする。また、システム全体に生じる影響の評価値を記憶するための変数 Δt の確保と初期化を行い、処理を Step 2 に移す。Δt は、通知を受け取るたびに確保し、報告を行う機械ごとに区別して取り扱う。

一方、すでに他の機械に通知を送っている場合には、作業の処理開始時刻の変更によりシステム全体に生じた変更量に関する報告を受ける場合がある。この場合は、報告された値を Δt に加算し、処理を Step 5 に移す。

repeat
　　Receive(message, ξ)
until message $\neq$ empty
if　message = “NOTICE”
then **Receive**($\hat{r}_{\eta,i}^{\zeta,v}, \xi$)
　　$\hat{s}_{\eta,i}^{\zeta,v} = max(\hat{r}_{\eta,i}^{\zeta,v}, f_{\nu,j}^{\zeta,v-1})$
　　$\Delta t = 0$
　　goto Step 2
if　message = “REPORT”
then **Receive**(Δt_1,ξ)
　　$\Delta t = \Delta t + \Delta t_1$
　　goto Step 5

Step 2: 作業の終了時刻 $\hat{f}_{\eta,i}^{\zeta,v}$ を処理に要する時間 $p_{\eta,i}^{\zeta,v}$ に基づいて算出する。作業の終了時刻、すなわち、次の機械に対する作業の搬出時刻に変更があった場合には、Step 3 を、変更が無かった場合は、Step 6 の処理を行う。

　　$\hat{f}_{\eta,i}^{\zeta,v} = \hat{s}_{\eta,i}^{\zeta,v} + p_{\eta,i}^{\zeta,v}$
if　$f_{\eta,i}^{\zeta,v} \neq \hat{f}_{\eta,i}^{\zeta,v}$
then **goto** Step 3
else　**goto** Step 6

Step 3: 処理開始時刻の変更を行った工程が、別の機械により引き続き処理が行われる場合は Step 4 へ、変更を行った作業が、その製品の最終工程であった場合は、Step 5 に処理を移す。ここでは、対象とする作業が製品 η の i 番目の工程であることから、他の機械 φ にとって w 番目の作業になるような、製品 η の $i+1$ の工程の存在を確認する。

if　$j_{\eta,i+1}^{\varphi,w} \neq \{\phi\}$
then **goto** Step 4
else　**goto** Step 5

Step 4: 次に作業を行う機械 φ に対し、変更後の仕事の受け渡し時刻を通知し、Step 1 に処理を移す。

$\hat{r}^{\varphi,w}_{\eta,i+1} = \hat{f}^{\zeta,v}_{\eta,i}$
Send(“NOTICE”, φ)
Send($\hat{r}^{\varphi,w}_{\eta,i+1}, \varphi$)
goto Step 1

Step 5: Step 3 において取り扱った仕事がその製品の最終工程の場合、あるいは、Step 1 において通知を出した機械からの報告を受けた場合、次に自分が処理を行う作業の存在を調べる。すなわち、$v+1$ 番目に処理を行う製品 ψ の k 番目の工程にあたる作業の存在を確認する。該当する作業がある場合、その作業の処理開始時刻の変更を行い、Step 2 において $\hat{s}^{\zeta,v}_{\eta,i}$ に対して行っている処理を、$\hat{s}^{\zeta,v+1}_{\psi,k}$ に対して行う。作業が残っていない場合、Step 6 に処理を移す。

if $j^{\zeta,v+1}_{\psi,k} \neq \{\phi\}$
then $\hat{s}^{\zeta,v+1}_{\psi,k} = max(r^{\zeta,v+1}_{\psi,k}, \hat{f}^{\zeta,v}_{\eta,i})$
goto Step 2
else **goto** Step 6

Step 6: 最後に変更した作業の作業終了時刻の変更量を、Δt の値に加算する。ここで、機械の末尾の作業の処理終了時刻に変更があった場合にのみ、Δt_2 はゼロ以外の値をとる。Step 1 において、他の機械から報告のあった値 Δt_1 の値を Δt に記憶しているため、結局、Step 6 において報告する Δt の値は、最初に通知のあった作業 $j^{\zeta,v}_{\eta,i}$ に対して機械 ζ が変更を行った結果システム全体に生じた変更量になる。この値を、Step 1 の処理における通知の発信元である ξ に対して報告する。報告後は、処理を Step 1 に移し、他の機械からのメッセージを待つ。

$\Delta t_2 = f^{\zeta,v}_{\eta,i} - \hat{f}^{\zeta,v}_{\eta,i}$
$\Delta t = \Delta t + \Delta t_2$
Send(“REPORT”, ξ)
Send(Δt , ξ)
goto Step 1

一方、作業の処理順序を変え、システム全体のスケジュールを改善する場合の処理手順は、前述の処理と比べて、最初の処理と最後の処理が異なるだけである。機械は作業の搬入時刻と処理開始時刻の間に隔たりがある作業に着目し作業の処理順序を変え、着目した作業をより早い時刻に処理することで、システム全体のスケジュールの改善を試みる。次に処理の手順を示す。

Step 1’: 着目する作業の処理開始時刻を変更し、Step 2 に処理を移す。

$\hat{s}^{\zeta,v}_{\eta,i} \leftarrow s^{\zeta,v}_{\eta,i}$
goto Step 2

Step 6’: 最後に変更した作業の作業終了時刻の変更量を、Δt の値に加算し、処理を終了する。

$\Delta t_2 = f^{\zeta,v}_{\eta,i} - \hat{f}^{\zeta,v}_{\eta,i}$
$\Delta t = \Delta t + \Delta t_2$
Stop

4.3.3 情報交換手順の改善

作業の時刻調整のための情報交換に要する時間は、1 回の情報交換で交される情報量が比較的小さいため、主として機械間で交換される情報の回数に比例する。そのため、情報交換の回数が少ないほど、短時間での調整が可能になる。機械間の情報交換数を削減するためには、種々の方法が考えられるが、他の機械に作業変更の通知をする前に、あらかじめ処理開始時刻の変更が分かっている作業については、変更を終えておくことは、簡便であり比較的効果的である。具体的には、Step 2 の処理を次の処理に置き換える。

Step 2': 機械は他の機械に作業終了時刻の変更についての通知を出す前にその時点で変更が行われることが分かっている全ての作業の処理開始時刻を修正しておき、後に通知するためにこのことを記憶しておく。

$\hat{f}^{\zeta,v}_{\eta,i} = \hat{s}^{\zeta,v}_{\eta,i} + p^{\zeta,v}_{\eta,i}$
$k = v + 1$
while $k \leq n$ **do** $\{$
$\hat{f}^{\zeta,k} = max(r^{\zeta,k}, \hat{f}^{\zeta,k-1})$
$\Delta f^{\zeta,k} = \hat{f}^{\zeta,k} - f^{\zeta,k}$
$f^{\zeta,k} = \hat{f}^{\zeta,k}$
$k = k + 1$ $\}$
if $f^{\zeta,v}_{\eta,i} \neq \hat{f}^{\zeta,v}_{\eta,i}$ **or** $\Delta f^{\zeta,v}_{\eta,i} \neq 0$
then $\Delta f^{\zeta,v}_{\eta,i} = 0$
goto Step 3
else **goto** Step 6

ここで, n は機械 ζ が管理している作業の数である.

4.3.4 再帰的伝播法による情報交換の例

3 台の機械が 2 つの製品を製造する際のスケジュールを用いて、機械が作業開始時刻を変更した際に必要な情報交換方法について説明する。図 4.6 に示すように、ここでは機械 A が第 1 作業の開始時刻を一定量だけ遅らせた場合の情報交換の様子と、スケジュールの変更状態を示している。スケジュールの改善は、作業の処理順序を変更することで行われるが、この場合には交換したそれぞれの作業について、同様の手順に従って情報交換による調整を行えば良い。

まず図 4.6(b) において機械 A は、第 1 番目の作業時間を調整した後、その製品の次工程を受け持つ機械 C に対して第 1 作業の調整が必要であることを通知する。通知を受け取った機械 C は、図 4.6(c) において開始時刻の調整を行い、同様に次工程を受け持つ機械 B に通知を行う。機械 B は、通知を受けた作業の開始時刻の調整を行う。このときこの製品の次工程は存在しないため、今調整した作業の次の作業に着目点を移す。この作業に関しては時間調整をする必要が無いため、これ以上の通知は必要ないことがわかる。したがって図 4.6(e) において、機械 B に対して通知を行った機械 C に結果の報告を行う。この時に報告する内容は、最後に変更を行った機械 B の第 2 作業の時間変更量である。この結果、機械 C は、第 1 作業の時刻変更によって、システム内に生じた終了時刻の総和に対する改善量を知ることができる。

次に機械 C は第 2 作業の時刻調整と必要な通知を機械 B に対して行う。この様子は図 4.6(f) に示されている。この場合図 4.6(g) に示すように、機械 B は着目している作業に次工程も次作業も存在しないため、即座に機械 C に対して、変更した時間量を報告する。機械 C はこの報告を受けた時点で、時間調整を行う作業が無くなり、第 1 作業および第 2 作業の調整結果の合計を、機械 C が最初に通知を受けた機械 A に対して行う。

以上の情報交換の手順によって、作業の開始時刻の変更をシステム内の必要な機械に伝えることができ、またその変更によって生じるシステムの状態変化量を、作業の変更を行った機械自身が知ることが可能になる。

提案する情報交換方法における機械の動作に着目し、本手法の特徴を説明する。たとえば図 4.6(b) で機械 A が情報の通知を機械 C に対して行い、次に機械 A が一連の動作に参加するのは、図 4.6(h) において機械 C から報告を受ける場合である。機械 C は、最終的な報告を受けるまでに機械 B に対して 2 回の通知を行っているが、個々の通知に対して通知した機械 B から必ず報告を受けている。このようにひとつの通知に対しては、かならず報告を受けるが、このときに対象となる機械は同一の機械である。

したがって本論文で提案する情報交換方法を用いれば、機械は直接影響を与える機械のみを対象に情報交換を行うだけで、みずからの状態変更をシステム内の必要な機械だけに反映させることができる。また対象とした機械から報告される内容は、システム全体に生じた変更量であることが保証される。

4.3.5　改善した再帰的伝播法による情報交換の例

2 台の機械による 3 つの製品のスケジュールを例にとり、改善した再帰的伝播法の効果の説明を行う。図 4.7 は、改善前の再帰的伝播法、すなわち作業の処理開始時刻の調整を、ひとつづつ行いその都度変更に対する通知を行う方法によるスケジュールの調整の 1 例を示している。ここでも、機械 A が自分に割り当てられた作業のうち、最初に処理を行う予定にしている作業の開始時刻を時間 t だけ遅らせた場合について議論する。

このスケジュールの特徴は、機械 A の第 3 作業の処理開始時刻が、機械 B の第 2 作業の終了時刻よりも遅いことである。これは、機械 A が第 3 作業の前に別の製品の処理を行うスケジュールを採用した際に、その作業の終了時刻が、機械 B の第 2 作業の終了時刻より遅いため生じた現象である。機械 A の第 3 作業の開始時刻と、機械 B の作業終了時刻との間にある時間は、通常**待ち時間**と呼ばれる。待ち時間があることが常にスケジュールに悪い影響を与える分けではないが、物の流れが停滞の程度を評価する指標として用いることが可能である。

このスケジュール例の場合、機械 A の第 3 作業の待ち時間が、機械 A の第 1 作業の処理時刻の変更量に比べ小さいことに問題がある。図 4.7(d) に示されるように、機械 A の第 3 作業の最初の時刻調整は、機械 B からの通知によって行われる。ただしこの時に必要となる時刻調整量は、機械 A が第 1 作業の処理開始時刻を送らせた時間 t に比べ、少ない時間 $t_1(< t)$ だけの調整になる。機械 A 第 3 作業の時刻調整が再び行われるのは、図 4.7(j) に示すように、自らの管理する第 2 作業の調整が行われた直後である。結局、機械 A の第 3 作業は、2 回の調整により最初に第 1 作業を送らせた時間 t だけ、開始時刻が遅れることになる。

しかし、作業の作業処理時刻が変更されるたびに通知が行われる手順では、機械 A 第 3 作業の時刻調整に伴って、図 4.7(e) および (j) の 2 回の通知が機械 B に対して送られることになる。ここ

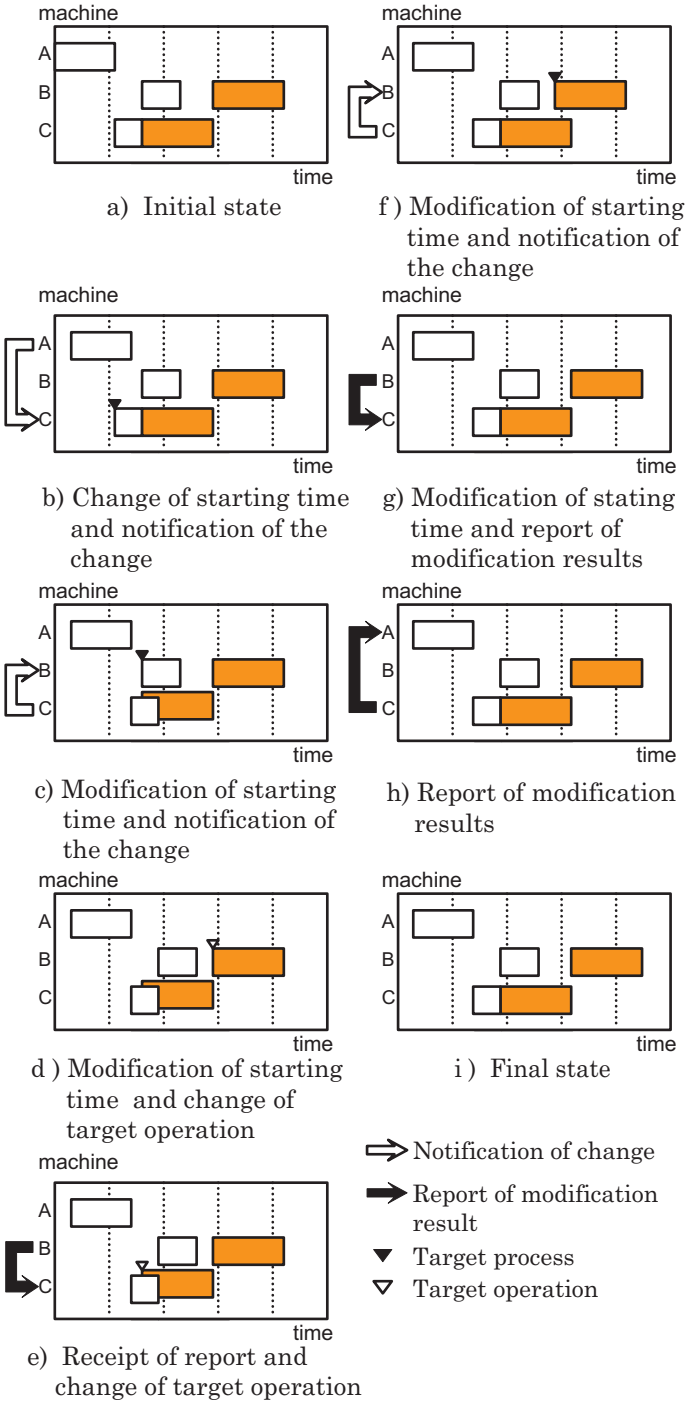

machine
A
B
C
time
a) Initial state
f) Modification of starting time and notification of the change
b) Change of starting time and notification of the change
g) Modification of stating time and report of modification results
c) Modification of starting time and notification of the change
h) Report of modification results
d) Modification of starting time and change of target operation
i) Final state
e) Receipt of report and change of target operation
Notification of change
Report of modification result
Target process
Target operation

図 4.6: Modification of schedule caused by change of starting time of operation on machine A and flow of messages exchanged among machines A, B and C

では、待ち時間が情報交換に与える影響について説明したが、作業間に生じる遊休時間も情報交換の回数に同様の影響を及ぼす。

図 4.8 に、改良後の再帰的伝播法による改善の様子を示す。対象とするスケジュールおよび最初に作業処理時刻を変更する作業および変更量は、図 4.7 と同様である。

改善後の情報交換手順の特徴は、他の機械に通知を出す直前に変更が行われることが分かっている作業については、あらかじめ調整を行っておく点にある。変更があり他の機械に通知することだけを記憶しておき、後に通知を行う。

図 4.8(b) は、調整が必要な作業全ての処理開始時刻の変更と、第 1 作業に関する通知を機械 B に送る様子を示している。図 4.8(c) に示されるように、改善前の情報処理手順と同様に、機械 B から作業処理時刻の変更に対する通知を受け取るが、この時点で機械 A 第 3 作業の時刻調整は行われないため、図 4.8(d) に示されるように即座に機械 B に対する報告が行われる。

結局、図 4.8 に示されるように、改良後の方法では影響を受ける全ての作業の作業処理時刻の調整に、3 回の通知の 3 回の報告が必要になり、合計 6 回の情報交換が行われることになる。これは、図 4.7 に示したように従来の手法では合計 8 回の情報交換が必要であったのに比べ、情報交換回数の削減が可能であることが理解できる。図 4.7 および図 4.8 から理解できるように、どちらの手法を用いても、機械は自分の行った行動を他の機械に伝えることが可能であり、また同時にシステム全体に与えた影響を定量的に把握することができる点についてはかわりない。

なお、複数の作業の時刻調整を行った際に、複数の機械に同時に通知を出すことにより、情報交換回数に変化はないが処理に要する総時間を減少させることが可能である。各機械が処理に要する時間や情報を受け取る頃合によって、情報の伝播の経路が一定に定まらなくなるが、最終的には同じ結果が得られる。ただしこの手法については本論文ではこれ以上の議論は行わない。

再帰的伝播法の特徴は、個々の機械は同じ場に存在するすべての機械に情報を伝える必要はなく、直接加工品を受け渡す機械についてのみ、その存在を知っていれば良い。自分の作業の代替を務めることが可能な機械を考慮にしたスケジューリングを行う場合や、工程設計についても機械自身が行うことを考える場合には、直接関係のない機械についても情報を持つ必要が出てくるが、その場合でも、全ての機械について動作を把握する必要ない。

また、提案する手法は、変更の必要な作業については必ず修正が行われることにある。本論文では、1 台の機械のスケジュールの変更がシステム全体に与える影響を遊休時間の増減によって評価する方法について説明している。この遊休時間の変化の他にも各作業に予定していた終了予定時間の変化や、顧客と契約した納期に対する影響などを評価値として用いることが可能である。しかし、一般的なスケジューリング問題で取り扱われるようなシステム全体の処理に要する総所用時間を評価の対象とすることは、システム内で最後に処理を行う機械と特定する必要があり、本論文で扱うような自律分散型のシステムには適しない。

ところで、一般的な自律分散型システムでは以下のことを基本的な特徴していることについては第**??**章で述べている。

(1) システムを構成するシステム要素は均質あるいは機能的に平等である。
(2) システム内には十分な数のシステム要素があり、故障により機能を停止したシステム要素の代替となる要素が存在する。
(3) システム要素はシステム全体の状態ではなく、周囲の限定された状況から得られる情報に基づいて行動を決定する。

本手法においても、各機械が同一の手順に従って情報処理を行い、また直接影響を与える限られ

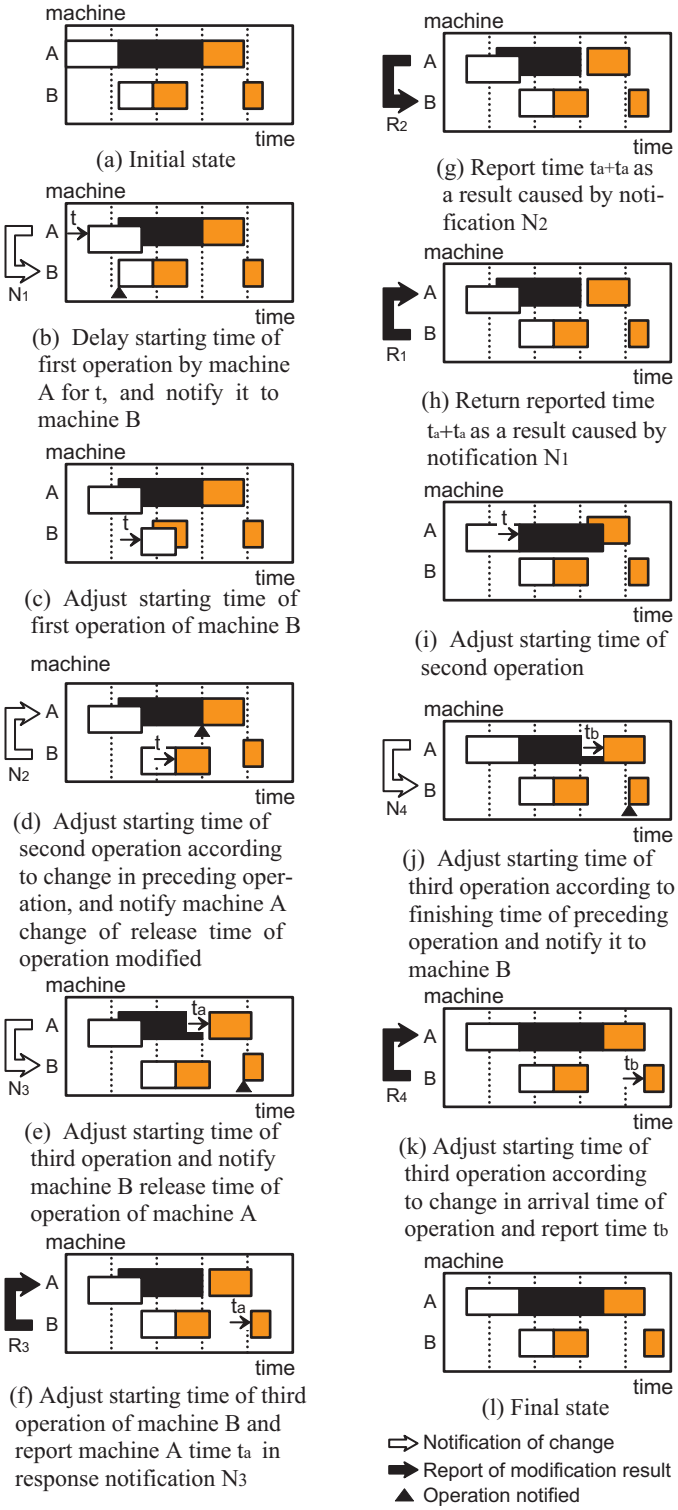

machine
A
B
time
(a) Initial state
t
N1
(b) Delay starting time of first operation by machine A for t, and notify it to machine B
(c) Adjust starting time of first operation of machine B
N2
(d) Adjust starting time of second operation according to change in preceding operation, and notify machine A change of release time of operation modified
ta
N3
(e) Adjust starting time of third operation and notify machine B release time of operation of machine A
R3
(f) Adjust starting time of third operation of machine B and report machine A time ta in response notification N3
R2
(g) Report time ta+ta as a result caused by notification N2
R1
(h) Return reported time ta+ta as a result caused by notification N1
(i) Adjust starting time of second operation
tb
N4
(j) Adjust starting time of third operation according to finishing time of preceding operation and notify it to machine B
R4
(k) Adjust starting time of third operation according to change in arrival time of operation and report time tb
(l) Final state
Notification of change
Report of modification result
Operation notified

図 4.7: An example of propagation of information according to conventional procedure

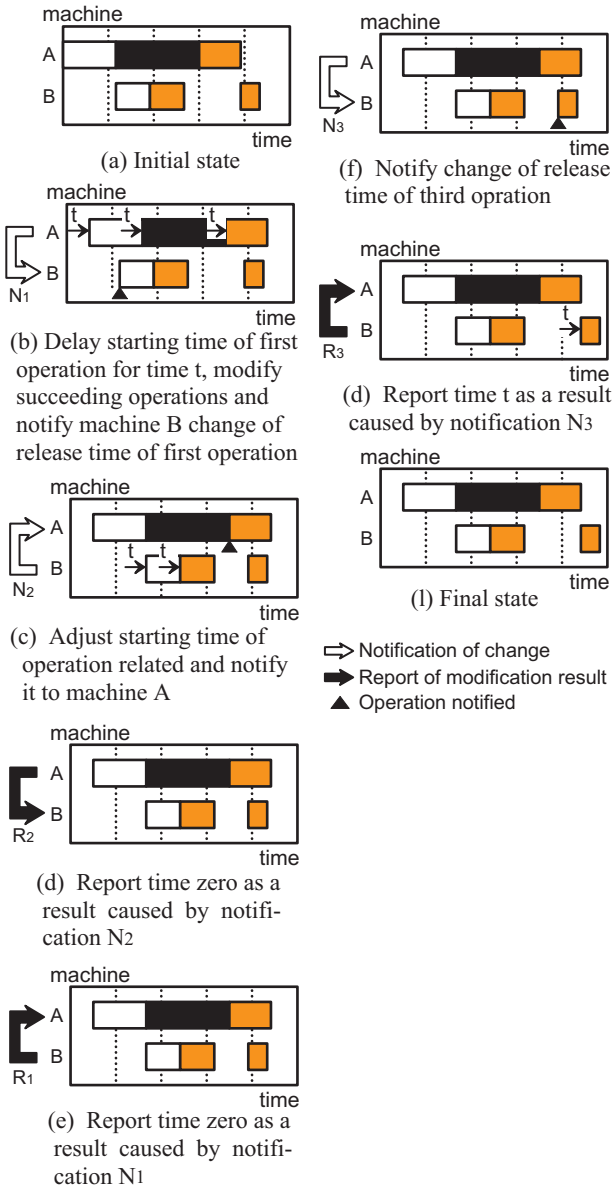


図 4.8: An example of propagation of information according to improved procedure

た機械との関係を持つ点では、このような自律分散型システムと同様の規範に従っていると言うことが可能である。

しかし、本手法で対象としている情報処理は、各作業の処理開始時刻あるいは処理終了時刻などの処理時刻に関するものであり、これは生産システム内のいかなるシステム要素の行動にも共通する情報処理である。言い換えれば、対象とする機械は、ここで暗に対象としている工作機械である必要はなく、組み立て作業を行うロボットや、AGV に代表される搬送用の装置であっても同じである。

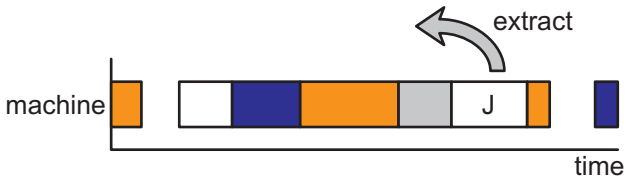
また、一般的な自律分散システムでは、対象とする機械について空間的に近くに存在するもの、

すなわち物理的な距離が近い機械に限定して扱う傾向が強く見られる。しかし本研究では、加工品を受け渡すという行為によって関連づけられる機械を対象としており、論理的な距離が近い機械に限定して取り扱う点が基本的に異なる。

4.4 計算例

4.4.1 情報交換回数の評価

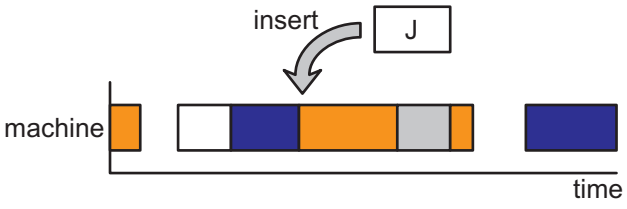
再帰的伝播法に従った情報交換により、機械は自らが行った変更を、直接影響を与える機械に限定して通知するだけで、システム全体に与える影響を知ることができる。しかしシステム内で間接的に行われる情報交換は、相当な回数になることが予想され、特に製品数が増加したときの情報交換の回数の増加傾向を把握することは重要である。情報交換の回数を理論的に把握することは困難であるため、計算機によるシミュレーションを行い、情報交換の回数を評価した。



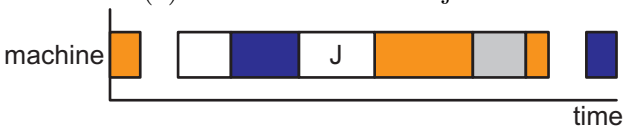
(a) Before extraction of job

(b) After extraction of job

図 4.9: Extracting a job from operation list managed by one machine



(a) Before insertion of job



(b) After insertion of job

図 4.10: Inserting a job into operation list managed by one machine

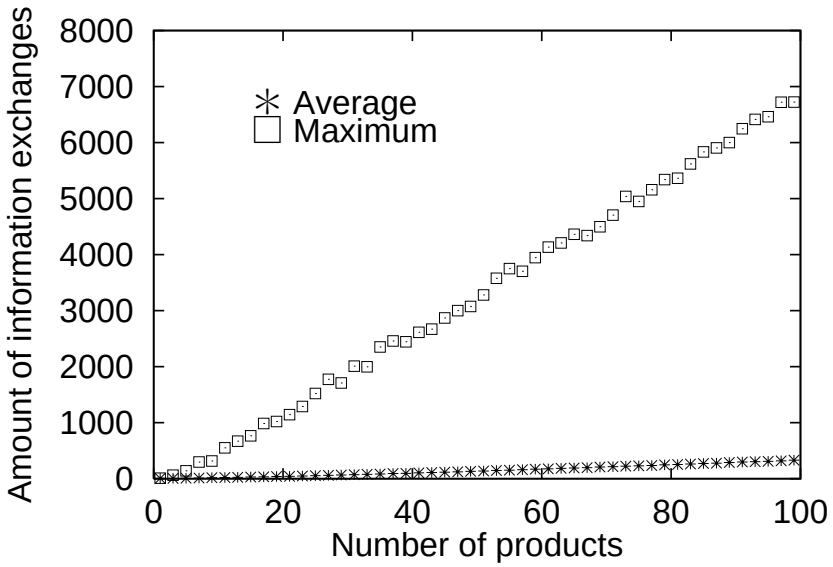


図 4.11: Relationship between number of products and amount of information exchanges among machines

ここでは機械数が 10 台のジョブショップスケジュール問題を想定し、製品数と情報交換の回数との関係について調べた。技術的順序と処理時間については一様乱数を用いて決定した。情報交換の回数は、機械が作業時間の変更を行った際のスケジュールの状態、および変更量によって異なる。そのためひとつのスケジューリング問題について、複数の規則に従って作業の処理順序を決定し、問題を構成するすべての作業について、作業開始時刻を変更した際に行われる情報交換の回数を評価した。作業時間の変更量については、着目する作業の処理時間と同じ時間とした。この変更は、後に述べるスケジュール改善のために行う作業順序の交換の際に必要な作業の抽出と挿入に当たる。

作業の処理順序を決定するためには、最早開始可能仕事優先 (EST:Earliest Starting Time)、最早完了可能仕事優先 (EFT:Earliest Finishing Time)、加工時間最小仕事優先 (SPT:Shortest Processing Time)、加工時間最大仕事優先 (LPT:Longest Processing Time)、先着作業優先 (FCFS:First Come First Served)、残り時間最小仕事優先 (FOR:Fewest Operation Remaining)、残り時間最大仕事優先 (MOR:Most Operation Remaining) の 7 種類の差立て規則 (dispatching rule) を用いた。

計算結果を図 4.11 に示す。ここでは、問題 200 題に対し、7 種類のスケジュール状態の全作業 (製品数×機械数）について作業の処理開始時刻の変更を行ない、観測された情報交換数の最大値と平均値を示している。図 4.11 から、情報交換の回数は、ほぼ製品数に比例して増加する傾向が認められ、平均的にみると、１回の作業時間の調整のために、製品数の 3 倍程度の情報交換が行われていることが分かる。そのため最終的なスケジュールを得るには、さらに試行回数倍の情報交換が必要となることが分かる。一方、差立て規則によって分散管理された機械がスケジュールを作成する場合には、割り当て可能な工程の状態を調べるために必要な情報操作だけで、最終的なスケジュールを得ることができる。このようにスケジュールの改善を行う手法は、作業実行時に処理する作業を選択する手法に比べて必要な情報の操作量が大きくなることが理解できる。

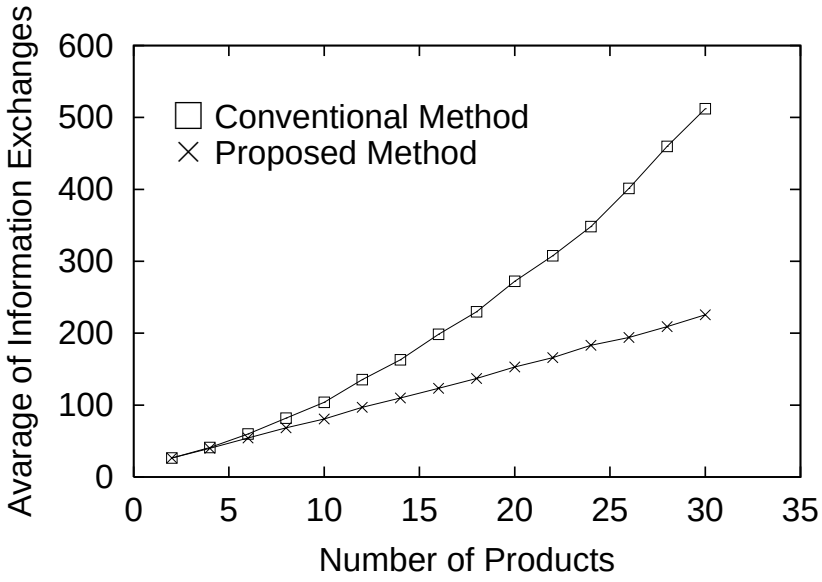


図 4.12: Relationship between number of products and amount of information exchanges among machines by improved recursive propagation method

図 4.12 に、情報交換手順の一部を改善した手法による機械間の情報交換回数を評価した結果を示す。図から明らかなように、通知の直前に調整可能な作業に対する処理を行うことで、処理に要する回数を減少させることができていることが確認できる。

4.4.2 再帰的伝播法を用いたスケジューリング

再帰的伝播法による情報交換を行うことで、機械は現在の予定している作業の処理手順の変更、すなわちスケジュールの変更を他の機械に伝え、同時にその結果システム全体に生じた変化を定量的に把握することが可能になる。スケジュールの変更を行う必要性については、予期せぬ事故や新たな作業の割り込みなど様々な状況を想定することが可能である。このような異常状態への対応の他にも、作業の処理順序の変更により、より良いスケジュールを立案することが考えられる。

提案する手法の有効性を評価するために、ジョブショップスケジューリング問題の準最適解を求めた。対象とした問題は製品数が 20 個、機械数が 10 台のジョブショップスケジューリング問題であり、一様乱数を用いて作成した。また作業の先着順に各機械のスケジュールの末尾に作業を割り当てた状態を、スケジュールの初期状態とした。また初期状態では、各機械は最後に処理を行う予定の仕事にマークをつけておく。本研究では、トークン (token) を用いて、スケジュールの改善を行う機械を決定する。トークンとは、ある動作の実行許可を運んだり、分散システムの状態を収集したりするために利用する特別なメッセージを意味する [12]。ここでは、1 個のトークンを用い、トークンを持っている機械だけが作業順序の変更を行うものとし、その他の機械は情報交換により作業の処理開始時刻の調整を行う。本研究では、機械は環状にネットワークを構成しており、トークンはネットワークに沿って順に渡されていくものとする。

本論文でスケジュールの改善のために用いた手順を以下に示す。

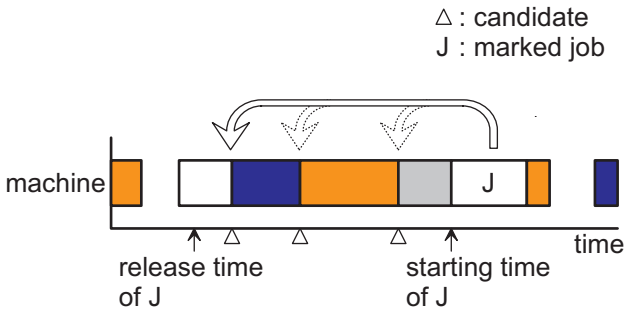


図 4.13: Search for suitable order of job

Step 1: トークンを受け取る。

Step 2: マークをつけた作業を起点として、その作業の処理開始時刻 $s^{\zeta,s}$ とひとつ前の作業の終了時刻 $f^{\zeta,s-1}$ を比較し、時間的に連続している作業をさがす。この仕事の搬入時刻 $r^{\zeta,s}$ より作業開始時刻 $s^{\zeta,s}$ が遅い場合には、より早い時刻に処理を始めることができる可能性があるため、その仕事にマークを移す。

Step 3: 図 4.13 に示すように、マークをつけた作業を搬入時刻よりも遅い時刻内で、前方の作業と処理順序を交換する。作業の処理順序の変更は再帰的伝播法により他の機械に通知を出す。報告の結果、受けとった Δt の値がゼロまたは負の場合には、スケジュールが改善されたことを意味するため、該当する作業順序を採用する。Δt の値が正の場合には、作業の処理順序を交換前の状態に戻す。作業順序の変更の候補が複数ある場合には、もっとも小さい Δt の値を与える作業順序に対して判定を行う。処理後は、マークを一つ先に処理する作業に移す。もしマークをつける作業が無い場合には、末尾の作業にマークをつける。

Step 4: トークンを次の機械に渡す。

スケジュールの改善のために用いた手法は、基本的には、Balas が提案した近傍に着目した手法である [13]。一般に、近傍のスケジュールの評価を行う手法は、スケジュール全体を把握する必要があり、集中的な機構が必要である [14]。本研究では、提案する情報交換手法を用いることで、分散的に管理された機械が自分で変更に対する評価を行うことが可能になる点に独自性を有する。

近傍を利用した手法は、クリティカルパス上にある作業に着目して、スケジュールを変更するものである。クリティカルパス上にある作業の処理順序の変更のみがスケジュールの改善を行う可能性があるためである。しかしクリティカルパスを同定するためには、システム全体のスケジュールを把握する必要がある。この条件は、ここで対象としている自律分散型のシステムの前提条件に反する。そこで本論文では、時間的に連続して処理される 2 つの作業は、クリティカルパス上に存在する可能性があると判断し、スケジュール改善のための候補とする。また時間的に連続する 2 つの作業の交換は、決して実行不可能なスケジュールにならないことが保証される。2 つの作業が交換可能かどうかの判断についても、提案する再帰的伝播法と同じ視点から導かれる手法によって処理することが可能である。しかし時間的に連続する作業についてのみ、交換を行うことでこのような付加的な処理は必要ない。

ここでは乱数によって生成した 1000 題の問題について検証を行い、代表的な 2 つの差立て規則との比較による評価を行った。比較に用いた差立て規則は、従来の研究で分散管理された機械の作

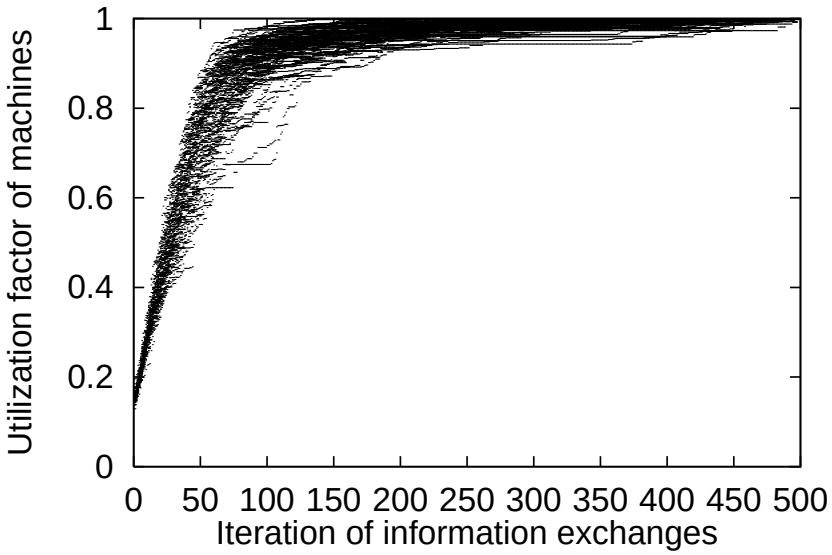


図 4.14: Convergence process

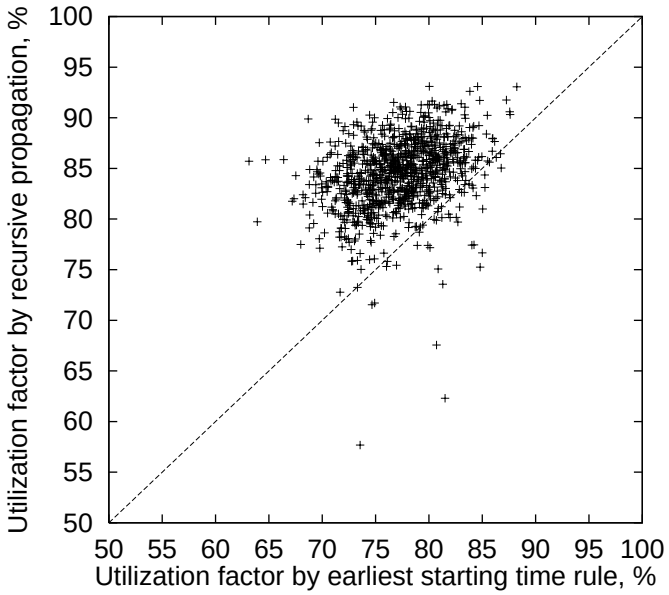
成するスケジュールを評価する際に用いているものを選んでいる [9]。本研究で提案する再帰的伝播法により得られる情報は、機械が作業を終了する時刻の変化に関するものである。そのため得られたスケジュールは、全作業時間の総和を、各機械が作業を終えるまでの時間の総和で除した値、いわゆる稼働率を用いて評価する。

図 4.14 は 1000 題のうち 100 題の問題について、スケジュールが改善されていく過程を示している。ただし各問題ごとに、最終的に得られる値は異なるため、ここでは各機械が 500 回の改善を試みた後に得られた稼働率を用いて基準化を行っている。図 4.14 から、試行ごとにスケジュールが改善されており、作業処理順序の変更が全体に与える影響を、各機械が正しく判断していることがわかる。

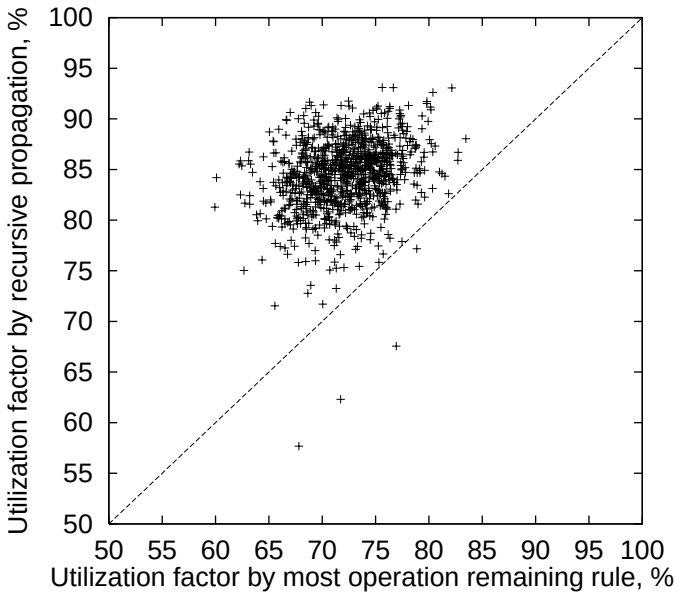
図 4.15 は対象とした 1000 題のスケジュール問題に対して、準備した 2 つの差立て規則を用いて作成したスケジュールから得られる稼働率との比較を行った結果を示している。図には、比較した 2 つの手法で同一の稼働率が得られたことを表す 45 °の傾きをもつ点線も示している。この結果から、対象としたほとんどの問題に対して、作業割り当て時に一般的に用いられる差立て規則よりも良い結果が得られていることが理解できる。

4.4.3 再帰的伝播法の適用範囲

再帰的伝播法は、すべての機械を管理するような特別な仕組みを必要とせずに、機械の行動の基礎となるスケジュールの操作を可能にする情報交換手順である。それぞれの機械は互いに整合性のとれたスケジュールに従ってさえいれば、出力結果を変えない限り個々の行動の内容については、他の機械の行動とは独立に意思決定を行うことが可能になる。たとえば、第 3 章で検討した工作機械をひとつのシステムとして捕えた場合に検討を加えた個々の行為は、本章で検討する機械間のスケジュールの整合性に裏付けられることになる。



(a) Comparison with earliest stating time rule



(b) Comparison with most operation remaining rule

図 4.15: Computational results of scheduling

提案する情報交換は、作業の受け渡しによって生じる機械間の依存関係を利用するものである。したがって、本章で取り扱うようなジョブショップ型の生産形態を有するシステムの他にも、典型的な流れ作業を行ういわゆるフローショップ型の生産形態のシステムに対しても適用することが可

能である。また、機械間の関係が 1 対 1 でなく、 複数の機械によって処理された作業を 1 台の機械が引き継ぐような場合や、1 台の機械による作業が工程の途中で複数の機械に分岐するような場合に対しても、基本的な情報手順を変えることなく利用することができる。さらには、自らが引き受けた作業を他の機械に代って行わせる場合にも、同様の手順により作業の処理時刻の調整を行うことが可能であり、他の機械が処理を行うことによる全体に与える影響を定量的に評価することができる [15]。このことは、システムに新たな機械を投入するような場合や、逆に故障や他のシステムで機械が必要になり機械をシステムから取り出すような場合に、機械間の依存関係の調整に応用することが考えられる。

また、作業の処理時刻を変更した際にシステムに生じる影響の評価について、ここでは、各機械に生じる遊休時間の増減に着目している。再帰的伝播法は、処理時刻の調整が必要になる作業については、かならず情報が伝達される。そのため、本論文で取り扱った遊休時間の他にも、各製品あるいは各作業ごとに設定した納期とのずれ量などの値を評価値として取り扱う [16] ことが考えられる。

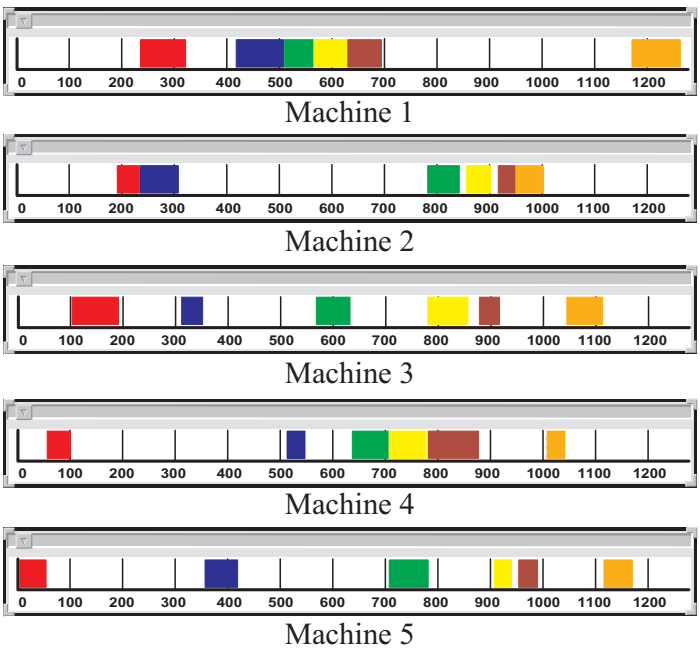
本論文では機械間の依存関係を定める工程設計は既知であることを前提に議論を進めている。工程設計を個々の機械が自律分散的に行うためには、さまざまな課題が残されているが、スケジュールを管理し調整するための手法は工程設計を行う際に不可欠な機能の一つとして位置づけている。冒頭にまとめたように、工程設計 (planning) とスケジューリング (scheduling) は互いに依存関係にある。すなわちスケジューリングを行うためには、工程設計が前提になるが、工程設計を行うためには、機械の使用状態を考慮する必要があり、状況によっては既存のスケジューリングを調整する必要がある。したがって、ここで提案する情報交換方法は、工程設計の自律分散的的な処理を行う場合にも、必要な機能のひとつとして位置づけられる。

ところで、本論文では、提案する情報交換方法の利用方法のひとつとして、スケジュールの準最適化を行うための手法を示している。ここでは、ジョブショップ型の生産形態を対象に、分岐限定法などで利用される近傍に着目した手法を基に再帰的伝播法の適用を試みている。すでに述べたように、ジョブショップ型のスケジューリング問題は、製品毎に機械間の関係が異なることを特徴としており、ここで取り扱うような自律分散型の生産システムを前提とした場合、検討課題として適当と考えられるためである。逆にフローショップ型の生産形態を対象とする場合、機械の処理順序は、すべての製品に対して同一であることを特徴しており、基本的に個々の機械の作業処理順序は、直前の作業を行う機械の処理順序に大きく依存する [4]。すなわち、一台の機械の作業処理順序の部分的な改善は、全体のスケジュールの改善につながることはほとんどなく、本論文でとりあげたような近傍に着目した局所的なスケジュールの変更によってスケジュールを徐々に改善することは期待できない。このような生産形態のスケジューリング問題に対しては、複数の機械が同時に 2 つの同じ製品の作業の処理順序の変更を行うための仕組みが必要になる他、自律分散型の生産形態が適しているかを吟味する必要があると考えている。

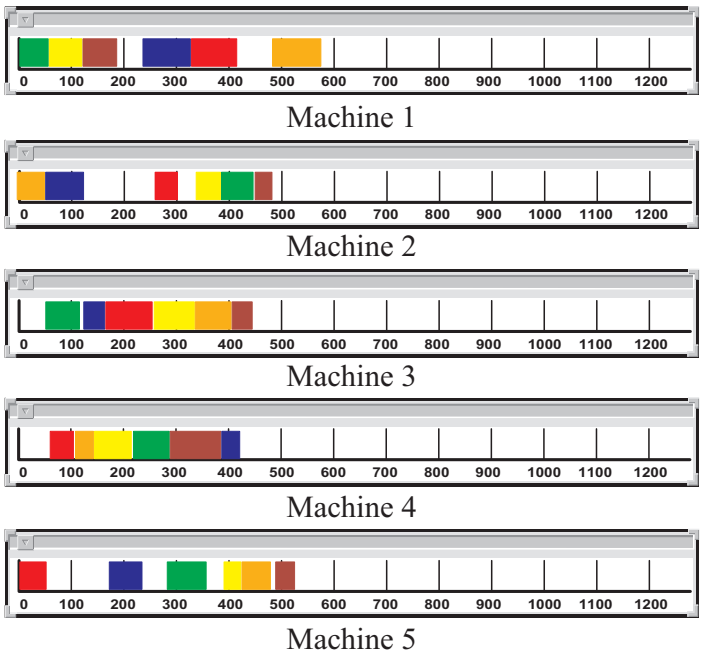
4.4.4 再帰的伝播法の実装例

提案する手法を実際に、工作機械に代表される装置に実装することを目的に、市販のパーソナルコンピュータ (PC: personal computer) に実装した結果について整理する。

再帰的伝播法に従ってスケジュールを調整する個々の機械が持つ情報は基本的に、自らが行う作業に関するスケジュールと、個々の作業の前後を処理する機械の情報のみである。ここでいう機械



(a) before optimization



(b) after optimization

図 4.16: Example of scheduling managed by each machine

の情報とは、情報交換を行う際に必要となる情報の送受信に関するものである。本研究では、情報交換の手段として、インターネット (Internet) で利用される汎用の通信プロトコルを利用する。そのため、情報交換のために必要な情報としては、送信先の機械の IP アドレス (Internet Protocol Address) および、使用するポート番号である。

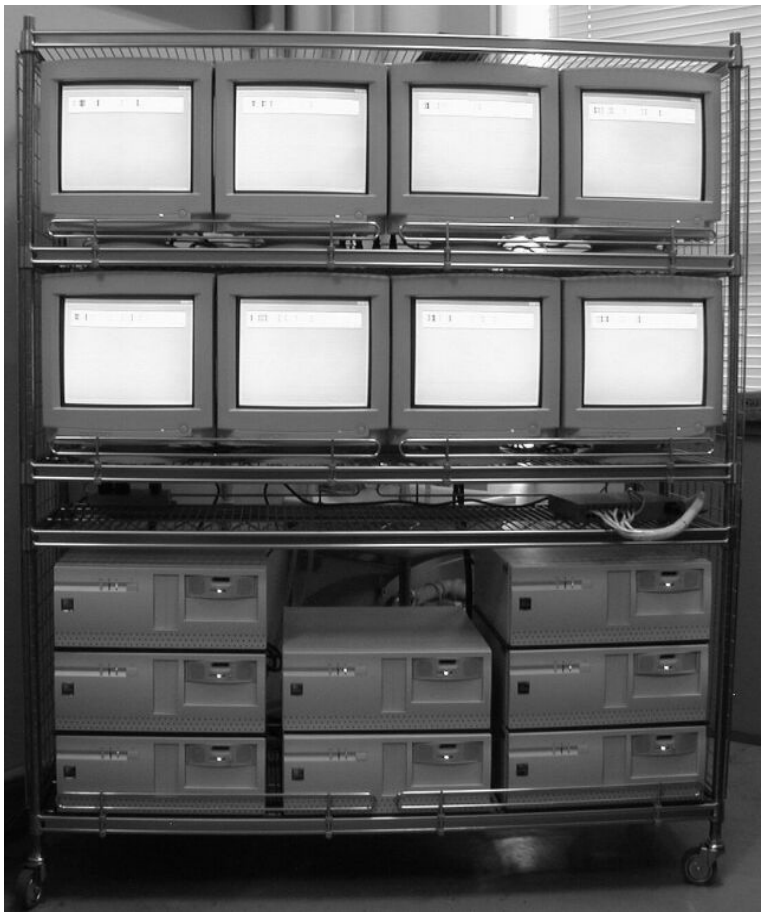


図 4.17: Apparatus of Platform constructed

一般にインターネットで用いられるソフトウェアは、サーバ・クライアントモデルを前提としている。この場合、最初の情報の送信は常にクライアントからサーバに対して始められることが前提となっている。そのため、この機構を本論文で用いるような手法に用いることができない。

ここで、開発したソフトウェアは、サーバとしての機能とクライアントとしての機能を兼ね備えた機能を持っており、特にサーバーとしての機能は、通信を行う必要な装置に応じて複数準備することができるように工夫してある。従って、通知を行う必要がある場合には、自らはクライアントとして通信相手をサーバと見なして情報の送信を行う。一方、通知を受け取った機械は必要な処理を終えた後には、獲得した情報を通知元に対して報告する必要があるが、この時には、自らをクライアントとして相手をサーバして情報を送信することが可能である他、従来のサーバ・クライアントモデルに従って、サーバとしてクライアントに情報を提供する形式を取ることも可能である。

図 4.16 に、実装した機械が持つスケジュールの様子を示す。図 4.16 に示すように、個々の機械

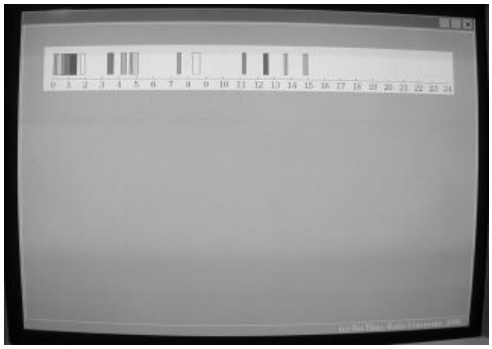


図 4.18: An example of display

は、自らのスケジュールのみを外部に表示する情報として有する。

図 4.16(a) は、作業割り付け時の最適性を考慮せずに、各機械が分担する作業をそれぞれの機械に配布した直後のスケジュールの状態を示している。機械は配布された作業を自らが管理するスケジュールの末尾に配置することで初期スケジュールを立案している。機械の遊休時間を考慮した作業割り付けや、遊休時間内に割り付けた作業が収まらない場合でも再帰的伝播法を用いて、他に影響を与えない範囲での作業の割り込みなどを行うことにより、初期の作業の割り当て時にある程度適したスケジュールを立案することが可能である。このような行動を機械に許可することで、準最適なスケジュールを立案するまでの試行回数を短縮することができるため、実際の機械の運用を考える場合には必要な行動と考えられる。ただし、ここでは、ハードウェアとして別個に準備された機械への実装可能性を判断することを目的としたために、作業割り付け時の工夫は行っていない。

図 4.16b) は、準備した全ての作業が割り付けられた後に、各機械が互いに情報を交換し、スケジュールをより良い状態に変更した結果を示している。先に述べたように、作業を割り当てるごとにその時点で最も良いと評価される状態にスケジュールを変更することを機械に許した場合には、このようなスケジュールの改善の前後という状態は存在しないことになる。

図 4.17 は、自律分散型の生産システムを模擬することを目的として、8 台の PC を用いて構築したシステムを示している。各 PC は、個々の工作機械などの生産設備に対応する。たとえば、第 3 章で取り扱った工作機械を制御する上位計算機に対応する。このようなシステムを利用し、提案する手法の動作を確認することにより、再帰的伝播法による情報交換方法が計算機内のシミュレーションにとどまらず、実際の工作機械などを制御する情報処理装置にも利用できることを確認している。

4.5　結言

集中管理機構を持たない分散型の生産システムにおいて、最適化問題のひとつであるスケジューリングを行うために、再帰的伝播法と名づけた情報交換方法を提案した。これにより機械は、直接影響を与える機械とのみ情報交換を行うだけで、機械の状態変更をシステ内の関係するすべての機械に伝達することができ、またシステムに与えた影響を定量的に知ることが可能になる。ここでは本手法の有効性を、ジョブショップスケジューリング問題に対する計算機シミュレーションにより検証した。

本研究の内容は以下のように要約される。

(1) 工作機械を生産システムを構成するシステム要素のひとつとみなし、スケジューリング問題の位置づけについて説明した。また、個々の機械が自律分散的に振る舞う形態のシステムについて、スケジューリング問題を取り扱うときの問題点を指摘した。

(2) 自律分散的な機械が、限られた情報を元に自らが管理する作業の処理時刻に関する変更を他の機械に伝え、またシステム全体に生じた変更量を把握するために、再帰的伝播法と名付けた手法を提案した。また、提案する手法の情報交換手順の一部を改善することにより、より少ない情報交換数によって、目的の処理を行うことが可能であることを示した。

(3) 再帰的伝播法の応用例として、ジョブショップスケジューリング問題を取り扱う方法の説明を行った。提案する手法は、計算機シミュレーションにより評価した。従来法としてディスパッチングルールによって得られるスケジュールとの比較評価を行った結果、良い結果が得られることを示した。また、製品数の増加に伴う情報交換数の増加についても評価を行い、提案する手法の妥当性を示した。

(4) 再帰的伝播法による情報交換機能を備えた機械から成る生産システムを複数のパーソナルコンピュータを利用して構築し、提案する手法の実現可能性を示した。

参考文献

[1] Nils R. Sandell,Jr., Pravin Varaiya, Michael Athans and Michael G. Safonov, Survey of decentralized control methods for large scale systems, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. AC-23, No.2, pp.108-127, 1978.

[2] 森欣司, 宮本捷二, 井原廣一, 自律分散概念の提案, 電気学会論文誌 C, Vol.104, No.12, pp.303-311, 1984.

[3] John F.Muth and Gerald L.Thompson, Industrial scheduling, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1963.

[4] 関根知明, スケジューリングの理論, 日刊工業新聞社, 1971.

[5] Jacques Calrier, The one-machine sequencing problem, European Journal of Operation Research, Vol.11, pp. 42-47, 1982.

[6] J. Calrier and E. Pinson, An algorithm for solving the job-shop problem, Management Science, Vol.35, No.2, pp.164-176, 1989.

[7] 森脇俊道, 杉村延広, Yatna Y. MARTAWIRYA, 蜷川達也, 自律分散型生産システムの設計と運用に関する研究 (基本構成と生産スケジュールへの適用), 日本機械学会論文集 C, Vol.58, No.5, pp.58-63, 1992

[8] 馬殿英, 大場史憲, 李金良, 自律分散型リアルタイムスケジューリングのためのカラーペトリネットによるモデル化手法, 日本機械学会論文集 C, Vol.63, No.12, pp.324-331, 1997

[9] 田村信介, 岡宅泰邦, 関俊文, 古澤均, 分散スケジュールの一方式 (知的分散システムのスケジューリング機構), 電気学会論文誌 C, Vol.109, No.4, pp.291-298,1989.

[10] 鳩野逸生, 橘一成, 馬野元秀, 田村坦之, フレキシブル生産を対象とした分散型リアルタイムスケジューリング, 計測自動制御学会論文集,Vol.31, No.1, pp.108-115,1995

[11] 三上貞芳, 嘉数侑昇, 確率的ルールによる動的タスク割当問題へのアプローチ, 日本機械学会論文集 C,Vol.58, No.7, pp.270-275, 1992

[12] 亀田恒彦, 山下雅史, 分散アルゴリズム, 近代科学社,1994

[13] Egom Balas, Machine sequencing via disjunctive graphs: an implicit enumeration algorithm, Operations Research, Vol.17, No.6, pp.941-957,1968.

[14] 山田武士, 中野良平, クリティカルブロックシミュレーティドアニーリング法によるジョブショップスケジューリング問題の解法, 電気学会論文誌 C, Vol.114, No.4, pp.476-482,1994.

[15] 樋野励, 森脇俊道, 分散型生産システムにおけるジョブショップスケジューリング－代替機械がある場合の情報交換－, 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, p.102,1998

[16] 樋野励, 森脇俊道, 知能化工作機械の運用に関する研究, 日本機械学会第 76 期通常総会講演会講演論文集 (V), pp.331-332, 1998

第5章　システムとシステム要素としての工作機械

5.1　緒言

一般にシステムはシステム要素として、あるいはシステム要素はシステムとしての側面を見いだすことが可能であることは、すでに述べてきたとおりである。本章では、このようなシステムとシステム要素の 2 つの側面を同時に考慮した場合の、工作機械に代表される生産設備の振る舞いについて検討を行う。ここでも、前章と同様にスケジューリング問題を生産設備や工場が行動の基準とする問題として認識し、対象物をシステムおよびシステム要素として取り扱う場合の情報交換の方法について検討した結果について述べる。

スケジューリング問題は、機械に割り当てた作業の処理順序を決める問題であり、複数の機械によって構成される生産システムの生産性を決定する上で、極めて重要な問題のひとつである。そのためスケジューリングの手法については、さまざまな生産形態に対して各種制約条件の下で数多くの検討が行われている [1]–[3]。特に最近では、変種変量生産を前提として、分散的に管理された機械によるスケジューリング手法に関する研究成果が報告されている [4] – [8]。

しかしこれらの研究はいずれも、システムの構成要素である機械に関するスケジュールのみを対象としている。そのため、システムが複数の作業からなるバッチを、複数の機械からなるセルに割り当てる場合の順序についてはあまり検討が行われてない [9]。そのため複数のシステムを対象とした場合のスケジュールについては取り扱うことができない。

本章では、大規模かつ複雑な構造を有する生産システムを効率的に運営するために、階層構造を有する生産システムのスケジューリング問題に関する検討を行う。まずシステムを構成する要素の包含関係に基づいた階層構造に着目し、階層型ジョブショップスケジューリング問題の定義を行う。つぎに分散管理された機械が自ら管理しているスケジュールを変更する際に用いる情報交換方法として前章で提案した再帰的伝播法 [10] を、システムが階層構造を持つ場合に拡張する。提案する手法の妥当性は、計算機シミュレーションにより検証を行う。

5.2　システムの階層構造とジョブショップスケジューリング問題

5.2.1　システムとシステム要素

生産システムは包含関係に基づく階層構造をもつ代表的な例である。図 5.1 は、代表的な生産システムの階層性を模式的に表している。図 5.1(a) は、代表的な工作機械を、また図 5.1(b) は、異なる機械から成るセル (cell) を表している。このようなセルを複数集めて図 5.1(c) に示すようなショップ (shop) が構成される。ショップがある建物の集合は工場 (factory) と呼ばれ、図 5.1(d) のような形態をとる。さらに工場は、図 5.1(e) に示すように、他の工場や消費者と関係を持ち、産業 (industry) を形成する。このような関係は、産業のさらに上位に対しても、反対に機械を構成する

機械要素についても考えることが可能である。

このようにシステムとシステム要素の関係は、観測者の視点に依存するものであり、対象物を取り扱う場合には、システム要素としての役割とシステムとしての役割を正しく理解する必要がある。

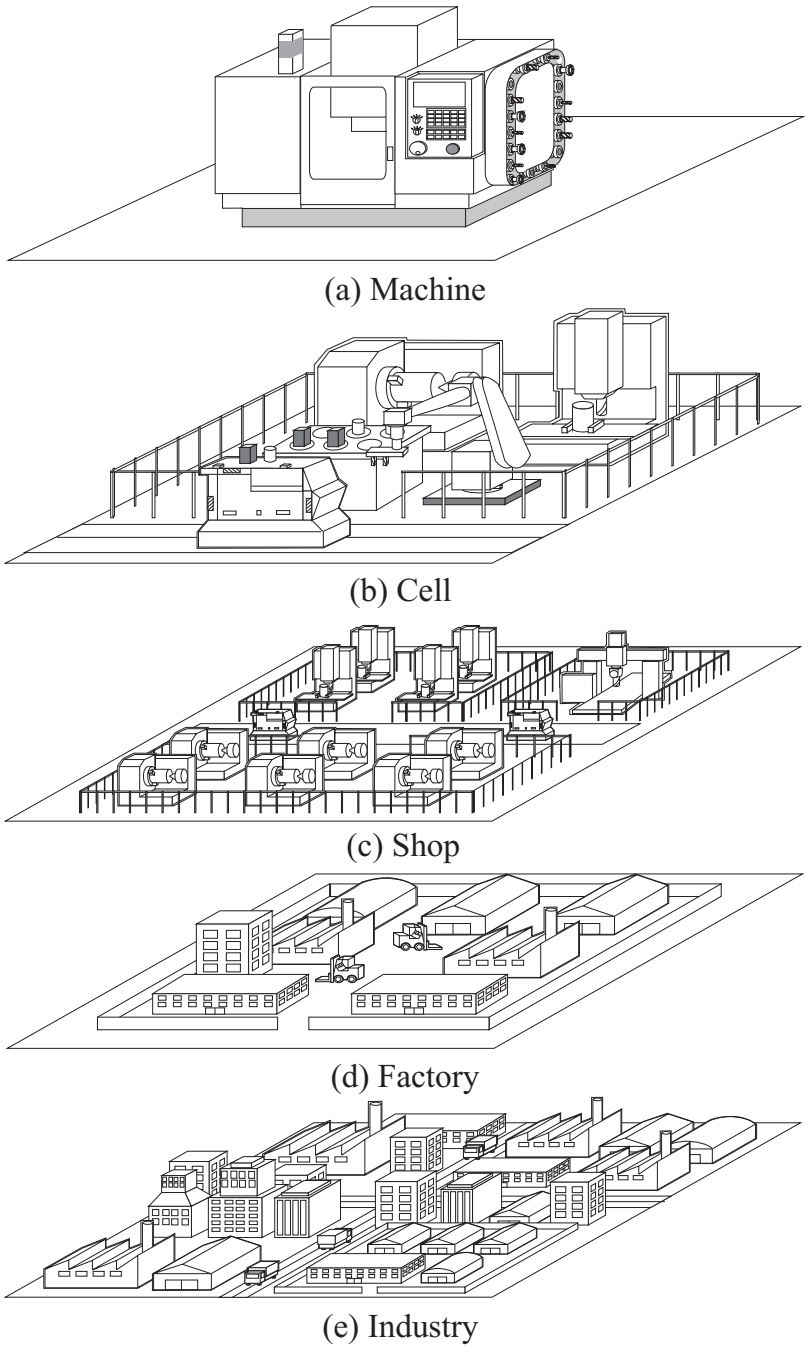


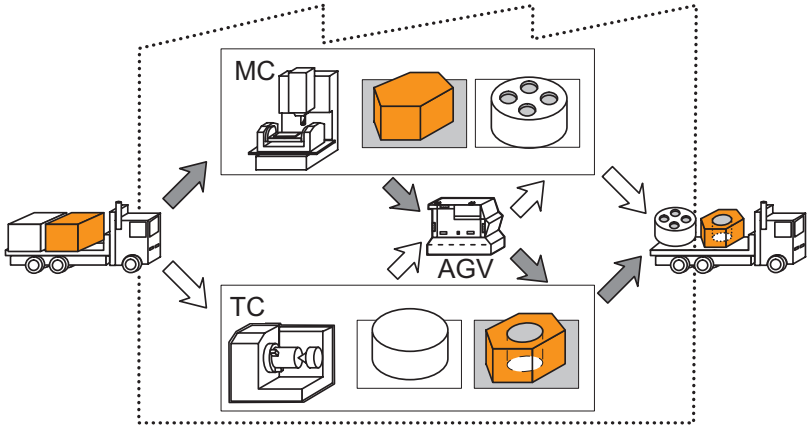
図 5.1: Hierarchical structure in a manufacturing system

ここで用いたセルやショップなどの名称は機械の集合体に対して便宜上つけられるものであり、一般には個体を意味して用いられることはない。そのため従来の研究では、工程計画や作業計画は、実体をもつ機械に対して行われている。しかし実際には、工場間の仕事の配分や企業間での交渉が行われることから理解できるように、実体を持たないものに対する効率的な運営方法を考えなくてはならない。

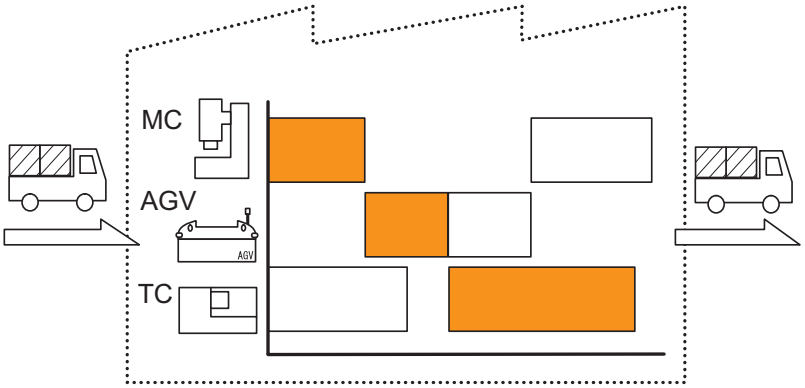
本研究では、このような複数のシステム要素から成るシステムを、改めて 1 つのシステム要素とみなし、階層型の生産システムを取り扱う。

5.2.2　階層型ジョブショップスケジューリング問題

スケジューリング問題を考える場合には、対象とする生産設備の作業単位を定義する必要がある。工作機械をシステム要素として取り扱った場合には、個々の加工作業を工作機械の作業単位としている。ここでは、対象とする生産設備が複数の要素から成り立っている場合に、要素の作業から生産設備の作業を考える。



(a) Material flow in a factory



(b) Schedule in a factory

図 5.2: Job operation and scheduling in factory

図 5.2 は、工場を対象とする生産設備とし、工場を構成する要素を機械としたときの、工場内で行われる作業とスケジュールを示している。図 5.2(a) は、工場に材料が搬入され、複数の機械により必要な加工作業を行った後、製品として工場から搬出されている様子を示している。5.2(b) は、その時に得られるスケジュールの 1 例を示している。このように、機械は加工作業を行っている際に機能していると認識され、その時には機械を構成する機械要素の少なくともひとつが稼働している状態にある。同様に、工場が機能している状態は、工場を構成する機械のうち少なくとも 1 台が稼働していることと考えることができる。一般にスケジュールは、1 台も作業をしていないように立案される。従って、工場に材料が投入され、製品が搬出されるまでの間は、工場は機能しており、その間になされた作業全体が工場にとっての作業と考えることが可能である。図 5.3 は、この様子を模式的に示している。

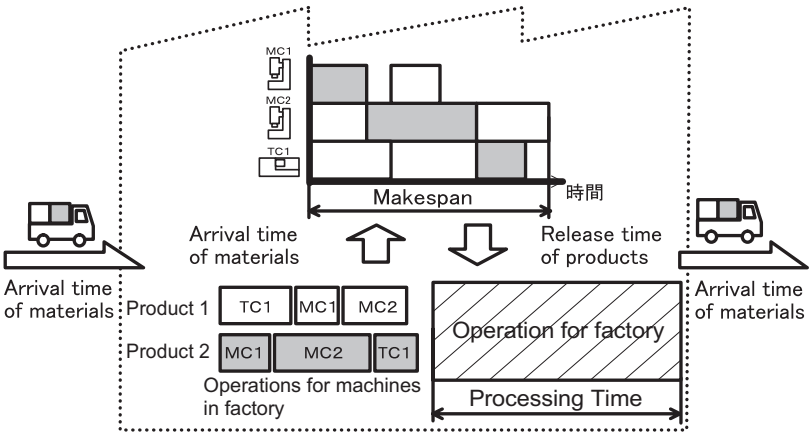


図 5.3: Relationship between schedule for machines and job for factory

図 5.4 は、スケジュールを立案するときの作業の処理開始時刻に関する制約を模式的に示している。前章でも取り扱ったように、その作業が関係する製品の先行する工程の終了時刻か、同じ機械上で処理される先行する作業の終了時刻のいずれか遅い方が着目する作業の処理開始時刻になる。

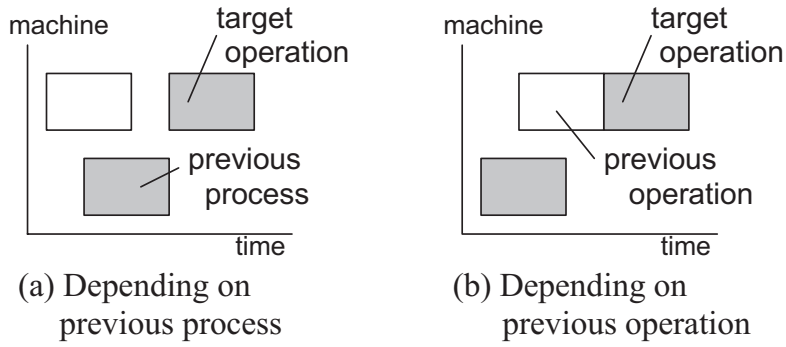
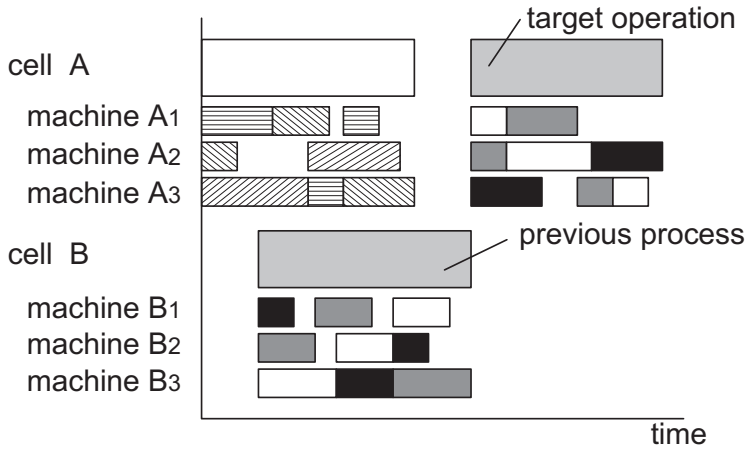
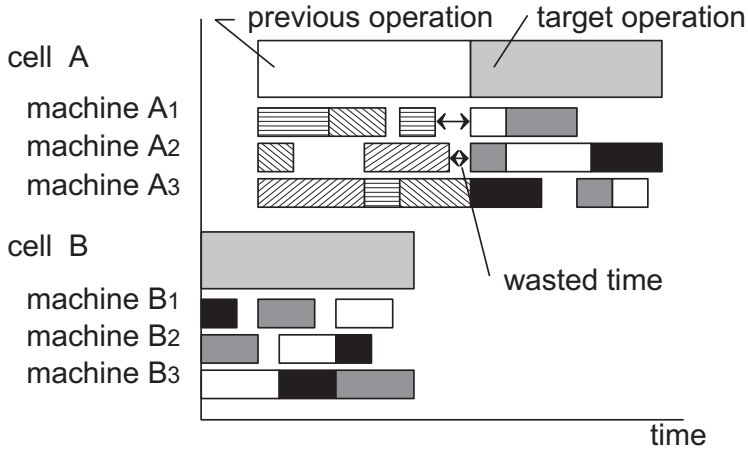


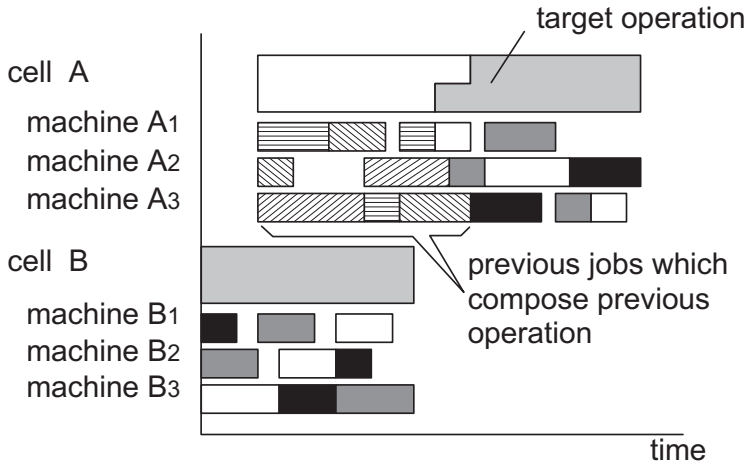
図 5.4: Decision of starting time of operation



(a)Depending on previous job processed by cell B



(b) Depending on previous operation



(b') Depending on previous jobs processed by machines

図 5.5: Decision of starting time of operation in hierarchical manufacturing system

図 5.5 は、同様に機械群によって処理される作業群に要をセルの作業と考えて立案したスケジュールを示している。図 5.5(a) は、他のセルで先行して処理される工程の終了時間が制約になり、着目するセルの作業開始時刻が決まる様子を示している。この図から理解できるように、この場合セルに作業群が投入される時刻が、機械群の作業開始可能時刻になり、同時にセルの作業開始時刻になる。また、機械によるすべての作業が終了した時刻がセルの作業終了時刻になる。

図 5.5(b) は、同一セル上で処理される先行する作業の終了時刻が着目する作業の開始時刻になる様子を示している。この場合、機械 A_1, A_2 および A_3 は、セル B が終えた作業が投入されているにも関わらず、作業を開始していないことが理解できる。このような状態は、個々の機械が自分自身で作業の処理順序を計画することと矛盾する。機械は、先行する作業が終了し、次の作業に着手可能であれば、その時刻から処理を始めるべきである。この状態を考慮して立案されるスケジュールの様子を図 5.5(b') に示す。

一般に、スケジューリング問題では機械が同時に処理することができる作業はひとつであるという制約が加わる。しかし、セルのスケジュールから理解できるように、対象とする生産設備が複数の要素から成り、個々の要素がそれぞれ機能する場合には、同時に 2 つ以上の作業を処理する可能性がある。このことは、機械を複数の機械要素、たとえば加工系駆動要素と ATP(Automatic Tool Changer) などの要素から成り、それぞれが同時に別個の動作をする状況を想定すれば、工作機械のような設備でも同時に 2 つ以上の処理をする状況を考えることは容易である。

5.2.3 用語の説明

本論文で使用する記号を以下にまとめる。本論文で特徴とするシステムとシステム要素の上下関係は、$\oplus$ および $\ominus$ の記号を用いて表現する。

e_i	i 番目のシステム要素あるいはシステム
$e^{\oplus}$	システム要素 e が構成するシステム
$e^{\ominus}$	システム e を構成するシステム要素
$J_{\eta,s}^{\zeta,v}$	機械 ζ が v 番目に処理を行う作業。また、製品 η を製造するための s 番目の工程。
$J^{\oplus}$	仕事 J が構成するバッチ
$J^{\ominus}$	バッチ J を構成する仕事
f_J	仕事 J の終了時刻
r_J	仕事 J の投入時刻
p_J	仕事 J の作業時間
C_J	バッチ J に含まれるすべての作業 $J^{\ominus}$ の処理に要する時間の総和

5.2.4 システムとシステム要素の関係

システムを下位のシステム要素の集合として定義する。すなわち、

$$e = \{e_i^{\ominus} | 1 \leq i \leq n\} \tag{5.1}$$

ここで、n はシステム e を構成する要素の数である。

一方、システム要素 e は上位のシステム $e^{\oplus}$ を構成する要素である。したがって、以下の関係が成立する。

$$e \in e^{\oplus} \tag{5.2}$$

システム要素によって処理される作業についても、以下に示す関係が成立する。ただし、バッチ J を構成する製品と仕事の数をそれぞれ、n_η, n_s とする。

$$\begin{aligned} &J = \{J^{\ominus}_{\eta,s} | 1 \leq \eta \leq n_\eta, 1 \leq s \leq n_s\} \\ &J \in J^{\oplus} \end{aligned} \tag{5.3}$$

次に、スケジューリングに必要な時刻として、v 番目に処理する作業 J^v の終了時刻 f_{J^v} を次式で与える。

$$f_{J^v} = \begin{cases} \max\limits_{J^{\ominus} \in J} f_{j^{\ominus}} & (J \neq \{\emptyset\}) \\ \max(r_{J^v}, f_{J^{v-1}}) + p_J & (J = \{\emptyset\}) \end{cases} \tag{5.4}$$

その他の関係については、一般的なスケジューリング問題と同じである。たとえば、作業 J の投入時刻 r は、他のシステム要素で処理される直前の工程の終了時間に等しく、次式で与えられる。

$$r_{J_{\eta,s}} = f_{J_{\eta,s-1}} \tag{5.5}$$

製造のために使用するシステム要素および使用順序はすべて既知とする。より具体的には、仕事 $J^{\zeta,v}_{\eta,s}$ に対して、ζ, η, s は既知であり、システム e および仕事 J の構造もすべて既知とする。そのため、個々のシステム要素の作業の処理順序 v のみを決定することを目的とする。

5.2.5　スケジューリング手順

複数の機械から構成されるセルのスケジュールの作成手順の 1 例を図 5.6 に示す。図 5.6(a) は、セルがスケジュールに割り当てるバッチを選択し、作業の処理順序を決定した様子を示している。この段階では、セルの作業の処理終了時間は未定である。セルに所属する各々の機械は、図 5.6(b) に示すように、作業の先行関係に従って、個々の作業の処理開始時刻を決定する。すべての作業についてのスケジュールが完了した時点で、図 5.6(c) に示すように、セルはバッチ内の全ての処理が完了する時刻、すなわちセルにとっての作業の終了時刻を知ることができる。この時刻は、他のセルへのバッチの投入時刻として、スケジュールを立案する際に利用される。

この図から理解できるように、機械は作業のスケジュールを立案する際には、すでに立案を終えている前の作業群に対する処理を終える時刻の影響を受ける。この作業終了時刻は、個々の機械毎に異なるため、セルが作業を機械群に投入する順序の影響を受けることになる。一方、セルは下層の機械群がスケジューリングを終えないと、作業の終了時刻を知ることができないことになる。ここでは、セルとそのセルを構成する機械群との関係を考えているが、セルが立案しているスケジュールは、上位であるショップや工場の作業の終了時刻を決めていることに他ならない。また、セルがスケジューリングを始めるきっかけは、上位のショップなどのシステムの意思決定による。すなわちショップが作業の処理順序を決定し、その条件のもとで、セルが作業のスケジュールを立

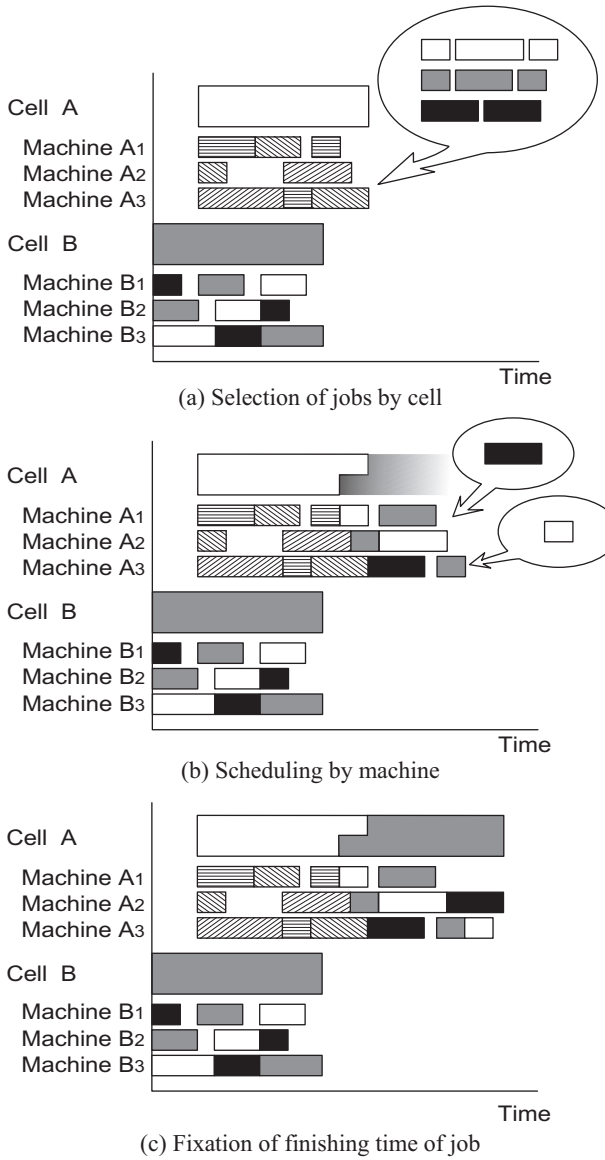


図 5.6: Scheduling procedure in the hierarchical manufacturing system

案する。その際、セルの個々の作業の処理終了時刻の決定は、セルが定めた処理順序にしたがって、機械が立案することになる。

このように、システム要素とシステムの区別をしないことにより、階層的な構造をもつ一般的なシステムの運営方法を考えることが可能になる。

5.2.6 スケジューリング改善案の評価

ここでは前章と同様に、個々のシステム要素はすでに得られているスケジュールに対して、自分に割り当てられた作業の処理順序を変更することで、システム全体のスケジュールの改善を試

みる。そのため最初に実行可能なスケジュールが得られていることが前提となるが、初期のスケジュールに関しては最適性を要求しないため、集中管理機構などの特別なシステム要素の介在を必要としないと仮定する。分散型の生産システムにおいては、システム要素による作業順序の変更がスケジュールに与える変化量をシステム要素自身が知ることができれば、立案した改善案の評価を行うことができる [10]。したがって、次式で与える値 ΔC_J を作業順序変更時のスケジュールの評価値とする。

$$\begin{aligned} \Delta C_J &= C_J - \hat{C}_J \\ C_J &= \sum_{\zeta} (f_{J^{\ominus}\zeta,L} - r_J) \end{aligned} \tag{5.6}$$

ここで、$f_{J^{\ominus}\zeta,L}$ は、バッチ J を構成する作業 $J^{\ominus}$ のうちシステム要素 ζ が最後に処理を行う作業の終了時刻を意味する。したがって、C_J は、バッチがシステムに投入されてから、各システム要素がそのバッチ J に含まれる全作業の処理を終えるまでの所要時間の総和を表すことになる。また、$\hat{C}_J$ は、作業順序の変更後の処理に必要な時間とする。

5.3　階層分散型生産システムにおける情報交換

5.3.1　システム要素の分散管理

システム要素の集合であるシステムを、ひとつのシステム要素として扱うことの利点は、分散管理の概念を、同一の場に存在するシステム要素に対してだけではなく、階層の概念を取り入れた大規模なシステムに対しても適用することが可能になる点にある。

本章では、分散管理されたシステム要素間の情報交換方法について提案を行い、階層分散型スケジューリングの手順を示す。

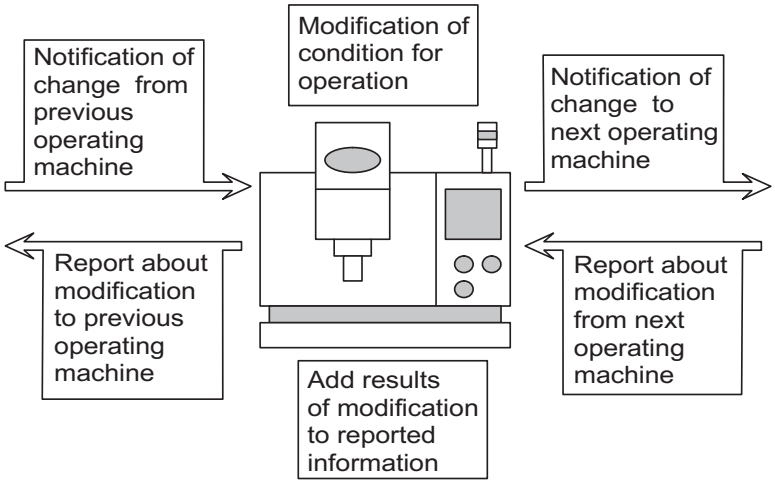


図 5.7: Information exchange among machines in a layer at the same level

5.3.2 再帰的伝播法による情報交換

本研究で取り扱うシステム要素は、状況の変化に応じて自分が受け持つ作業の処理順序を変えることで、システム全体のスケジュールを可能な限り最適に維持しようと試みる。このとき作業の処理順序の変更に伴い、作業の処理終了時刻に変更が生じる。

前章でのべたように、提案する情報交換方法では、図 5.7 に示すように、その製品を作るために必要な次の工程を受け持つ機械に対して、変更に関する通知を行う。通知を受け取った機械は、その仕事の作業処理時間の調整を行い、必要があればさらに次の工程を受け持つ機械に対して同様の通知を行う。この手続きは、機械の遊休時間内で終了時刻の調整が可能な場合や、それより後に処理を行う作業が無くなるまで繰り返し行われる。他の機械に通知を行う必要がなくなった場合には、通知を行ってきた機械に対して、調整結果の報告を行う。

このように、機械は自分の取った行動が直接的に影響を与える機械と情報交換を行うだけで、自らの行動をシステム内の必要なすべての機械に対して伝えることが可能になる。また同時にシステムに生じた影響を定量的に把握することができ、自らの行動の評価を行うことができる。この情報の伝播は、機械間で再帰的に繰り返されるため、提案する情報交換方法を再帰的伝播法と呼ぶ [10]。

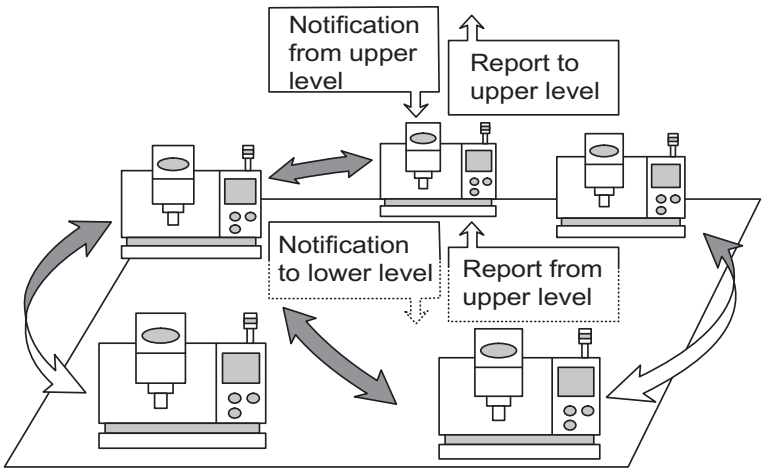


図 5.8: Information exchange with elements in upper and lower level layers

5.3.3 再帰的伝播法の拡張

階層型生産システムのスケジューリング問題の場合、上位のシステム要素のスケジュールの変更は、下位のシステム要素が作業に着手可能な時刻の変更を意味する。逆に下位のシステム要素のスケジュールの変更は、上位のシステム要素の作業の終了時刻の変更を意味する。そのため、スケジュールの変更を行ったシステム要素は、自分が所属する階層の他のシステム要素だけでなく、下層および上層のシステム要素に対しても変更を伝える必要がある。この様子を摸式的に図 5.8 に示す。

システム要素が階層構造を持つ場合も、再帰的伝播法の基本的な手順に従い情報交換を行う。す

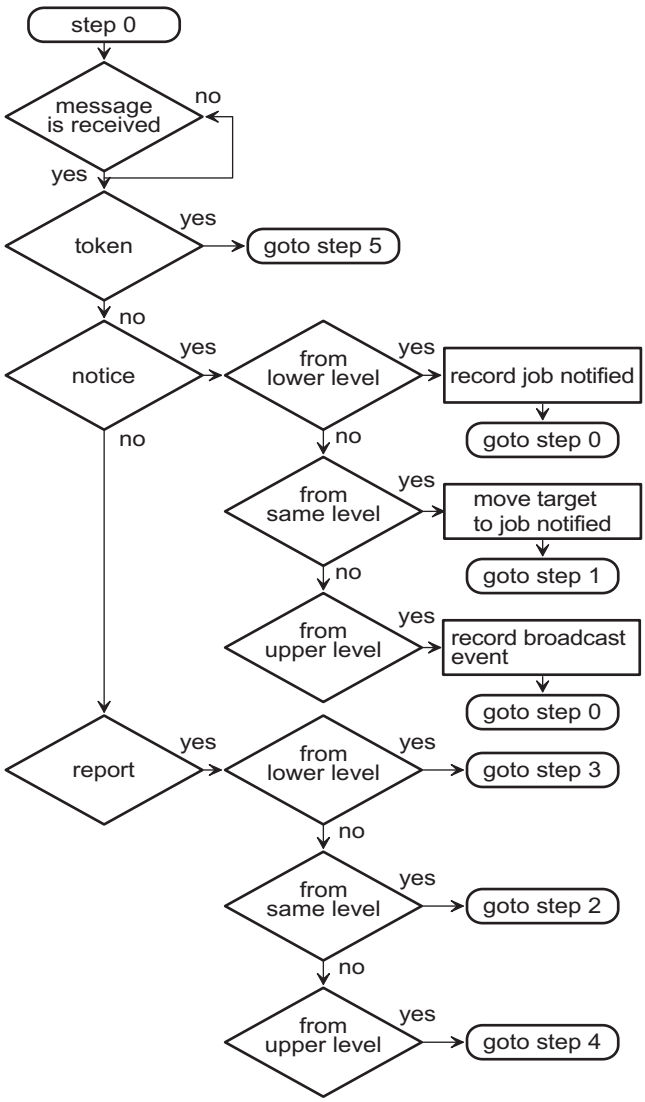


図 5.9: Flowchart of recursive propagation method for the hierarchical manufacturing system (part 1)

なわち、スケジュールの変更を行った場合には、直接影響をおよぼすシステム要素にのみ通知を行い、間接的に影響を与える要素との情報交換は、通知を与えたシステム要素に処理を委ねる。

本論文で提案するシステムが階層構造を有する場合の再帰的伝播法の情報処理手順を図 5.9 から図 5.12 に示す。

システム要素は、常に他のシステム要素からのメッセージを待っているものとする。メッセージには、作業変更に関する通知 (notice) と、その変更に対する報告 (report) の他にトークン (token) がある。

ここでトークンは、分散管理されたシステム要素間の同期を保つためにシステム毎に 1 つづ準備する。トークンは同じシステムを構成するシステム要素間で定められた順序に従い順番に交換

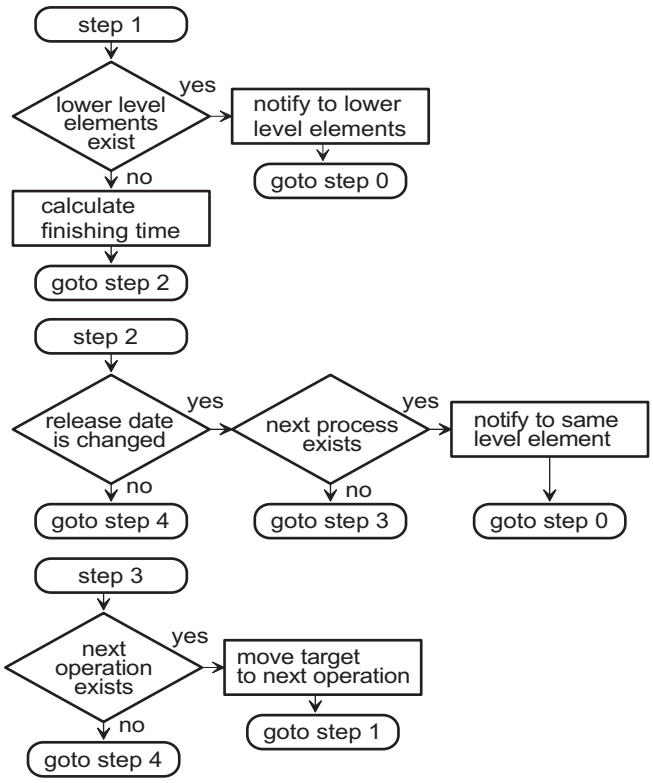


図 5.10: Flowchart of recursive propagation method for the hierarchical manufacturing system (part 2)

されるが、上下のシステム要素や他のシステムを構成するシステム要素とは交換されないものする。受け取ったメッセージがトークンの場合、システム要素は状況に合わせて作業順序を変更する権利を持つ。

下位層のシステム要素から通知があった場合、対象となる作業を記憶しておき、再び他のシステム要素からのメッセージを待つ。また上位層からの通知も同様に、通知の事象が生じたことを記憶しておき、再び他のシステム要素からのメッセージを待つ。特に上位層からの通知は、バッチの投入時刻の変更を意味するため、同位層の全てのシステム要素に対して同じ通知が出されていることを念頭においておく。通知が同位層の機械からあった場合には、その作業に着目点を移し、図 5.10 に示される処理を行う。

同様に報告を受け取った場合にも、発信元のシステム要素が所属する層に応じて、異なった処理を行う。

図 5.10 に示す 3 段階の処理は、基本的には、前章で説明した再帰的伝播法と同じである。すなわち作業の処理時刻の調整を行ない、変更があれば該当する他のシステム要素に新たな通知を出す。変更がなければ、自分が所有している結果を情報の発信元のシステム要素に報告する。従来の再帰的伝播法と異なる点は、作業の処理終了時刻を求める際に、下位にシステム要素がある場合には、直接終了時刻を求めることができず、下位のシステム要素によるスケジュールの結果を待たねばならない点にある。

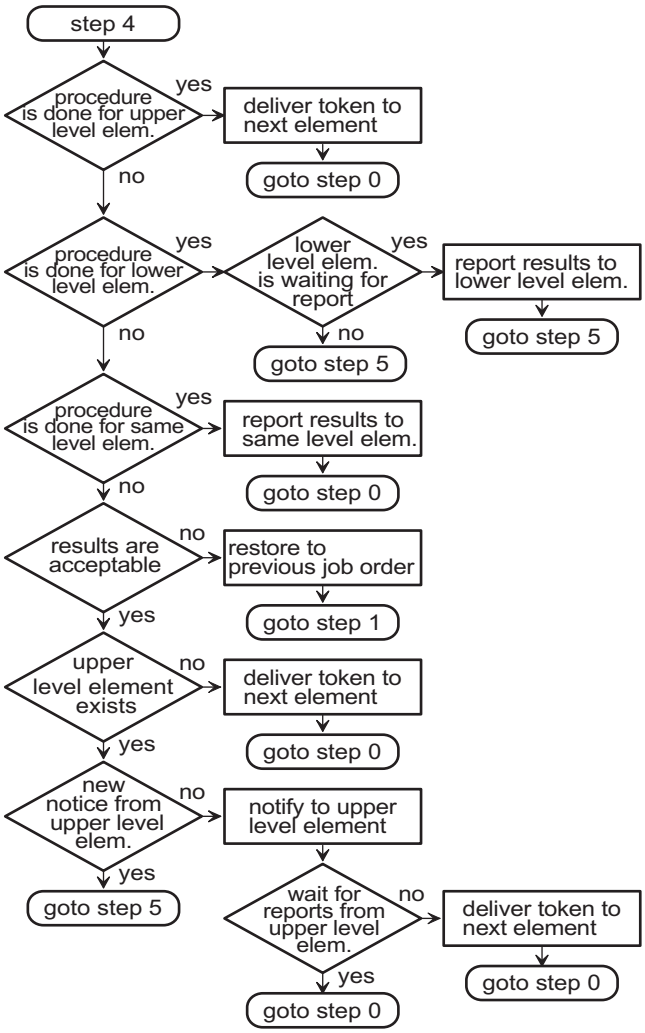


図 5.11: Flowchart of recursive propagation method for the hierarchical manufacturing system (part 3)

図 5.11 は、時間調整に対する処理を終えたときの、次の動作を決める手順を示している。時間調整を終えたシステム要素は、他のシステム要素からの依頼によりその処理を始めたのか、自分自身の判断により処理を始めたのかを判断する。

終えた処理が上位のシステム要素からの報告によって引き起こされた場合には、同位層の次のシステム要素に対してトークンを渡し、上位のシステム要素に対する時刻調整を行うように伝える。このとき最後に時間調整を行った作業の処理終了時刻をトークンと一緒に渡す。すでに前のシステム要素から処理終了時刻を伝えられている場合には、遅い方の時刻を伝える。結果として最も遅い時刻が伝えられ、最終的にこの時刻は上位のシステムが行う作業の終了時刻を意味することになる。一方下位の要素からの通知に対する処理を終えた場合には、下位の要素がその時間調整に対する報告を待っていれば、調整の結果システムに生じた時間の変化量を報告をする。下に報告する必要が無ければ、すぐに図 5.12 の処理を行う。また同位層の要素からの通知に基づく動作を終

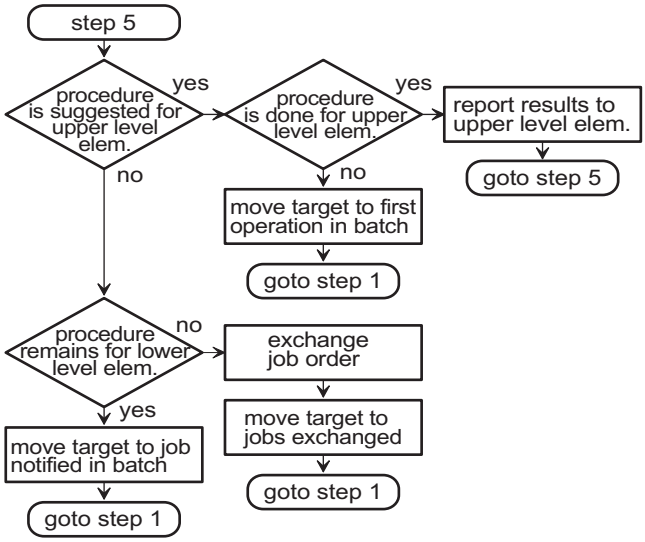


図 5.12: Flowchart of recursive propagation method for the hierarchical manufacturing system (part 4)

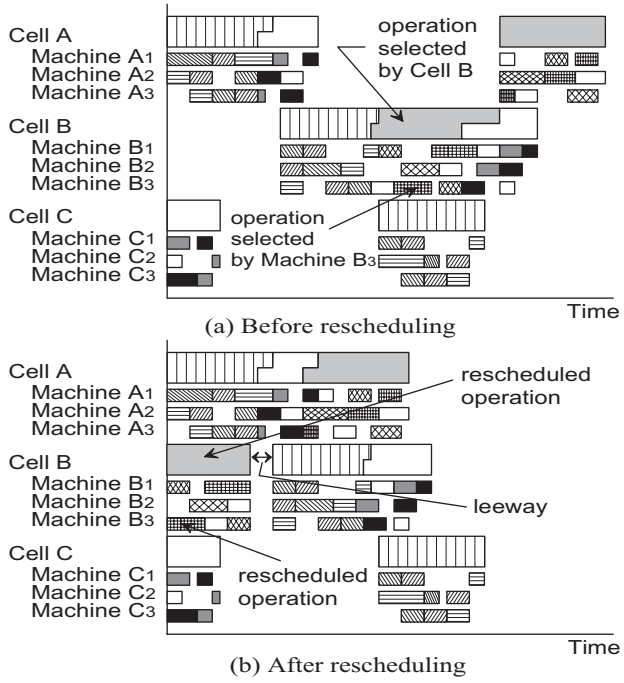


図 5.13: An example of decentralized scheduling in the hierarchical manufacturing system

えた場合は、従来の再帰的伝播法と同じである。

自分自身が行った作業処理順序の変更に対する処理を終えた場合、その処理の妥当性に対する判断を行う。システム要素は、再帰的伝播法により入手した結果がシステムに取って良いと判断でき

ない場合には、変更前の作業順序に戻す。具体的には、報告された時間調整による変更量は、各システム要素が最後に行う作業の終了時刻の変化量の総和値である。したがってこの値が正の場合にはスケジュールが悪化したことを意味し、負またはゼロの場合には改善されたことを意味する。この値をもとに、自分が行った変更を評価する。

作業順序の変更を採用する場合には、上位のシステムに変更があったことを通知する。このとき、上位層のスケジュールの変更に与える影響を把握する必要がない場合には、次の機械にトークンを渡す。上位層からの報告を待つ場合には、ステップ 1 に処理を移し、報告を受け取った後、再びステップ 4 において、上位層からの報告を反映した結果の妥当性の評価を行う。

図 5.12 にトークンを持っているシステム要素の処理の手続きを示す。トークンを受け取ったシステム要素は、上位要素に対する処理を行うことを促されているか確認する。すでに上位のシステム要素に対する処理を終えているにもかかわらず、この通知を受け取った場合には、上位の通知に対する処理が、自分を起点に同位層のシステム要素を 1 巡したことを意味している。この場合は上位のシステム要素に対して、通知によって知らされている作業終了時刻の最大値を報告する。処理をまだ行っていない場合には、そのバッチの最初に予定している作業の処理時刻の調整を行い処理をステップ 1 に移す。

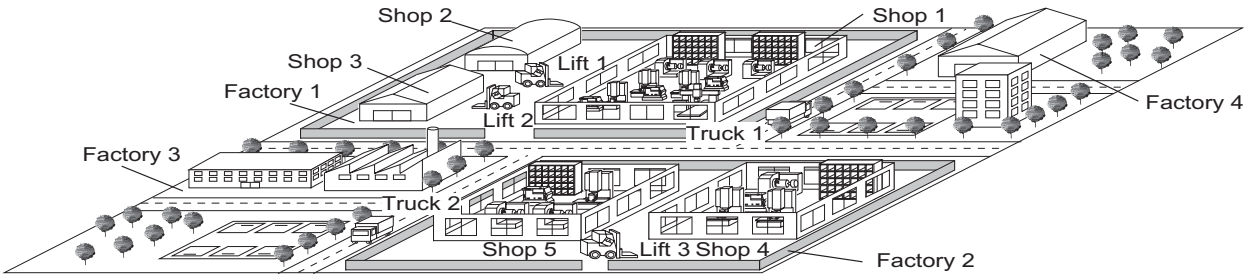


図 5.14: Schematic illustration of the hierarchical manufacturing system

上位のシステム要素からの通知が促されていない場合には、下位のシステム要素からの通知の確認を行う。該当する作業がある場合には、その作業に対して時刻調整の処理を行う。これらの時刻調整が必要ない場合には、自分が管理する作業の処理順序を変更し、スケジュールの改善を試みる。

ところで本論文で提案する情報交換を行うためには、システム要素は具体的な入出力と演算のための手段をもつ必要がある。冒頭に述べたように、複数のシステム要素からなるシステムを一つのシステム要素として扱う場合、実際にはシステム要素としての実体を持たない場合があり得る。この場合には、2 つの方法が考えられる。ひとつは、着目するシステム要素に対応する専用の情報処理装置を設けることである。もうひとつは、下位のシステム要素のひとつが、必要に応じて上位のシステム要素として振る舞うことである。実際の生産システムにおいては、両者の混在が考えられる。たとえば、工場の管理のみを行う者、機械の管理だけを担当する者、そして両方の職務を担う者がいることに対応している。

5.4 計算例

提案する階層型ジョブショップスケジューリング問題と再帰的伝播法に基づく情報交換の有効性を確認するために、計算機によるシミュレーションを行った。

まずそれぞれ 3 台の機械から構成される 3 つのセルを対象に、合計 12 個のシステム要素のスケジュールの検討を行った。システム要素が行うスケジュールの改善方法は、前章で述べた改善方法と同じである。

図 5.13 に計算機シミュレーション中に観察されたスケジュールの変更例を示す。ここでは作業の到着順に各システム要素が管理するスケジュールの末尾に作業を割り当てた状態を初期スケジュールとしている。図中矢印で示した作業の処理順序が変更され、全体のスケジュールが改善されていることが理解できる。ここで機械 B_3 が行った処理順序の変更は、セルが行った変更にかかわらずシステム全体のスケジュールの改善のために有効であることが図 5.13 の状態から判断できる。一方セル B が行った変更についても、B_3 の行動とは無関係に全体のスケジュールの改善に有効である。そのためこれらの動作は互いに独立に行うことができ、シミュレーションにおいても、個々のシステム要素が適切な改善を行っているいることが理解できる。

ところで図 5.13(b) から、セル B の第 1 作業は処理終了後セル A で処理され、実際に処理がされるまでには時間的な余裕があることが分かる。そのため、機械 B_1〜B_3 は、この余裕時間内で処理を遅らせることができる。この状態では、これらの機械がスケジュールを変更した場合、上位のシステム要素であるセル B から受ける報告によって、このことを知ることが可能である。

このような状況は実際の生産システムに多く見られ、こうした時間を利用して特急仕事や、他の機械が故障した場合の作業の再割り当てを行っていると考えられる。このことから提案する階層型のジョブショップスケジューリング問題は、現実の生産を行う上で必要な状況を適切に表現していると言える。また、再帰的伝播法に基づく情報交換により、システムの運営上必要な情報を正確に獲得できることが理解できる。

表 5.1: Structure of system elements

System	Elements
Enterprise	Factory1, Factory2, Factory3, Factory4, Truck1, Truck2
Factory1	Shop1, Shop2, Shop3, Lift1, Lift2
Factory2	Shop4, Shop5, Lift3
Shop1	Machine1, Machine2, Machine3, Machine4, Machine5, Machine6 AGV1, AGV2, AGV3
Shop4	Machine7, Machine8, Machine9, AGV4
Shop5	Machine10, Machine11, Machine12, AGV5

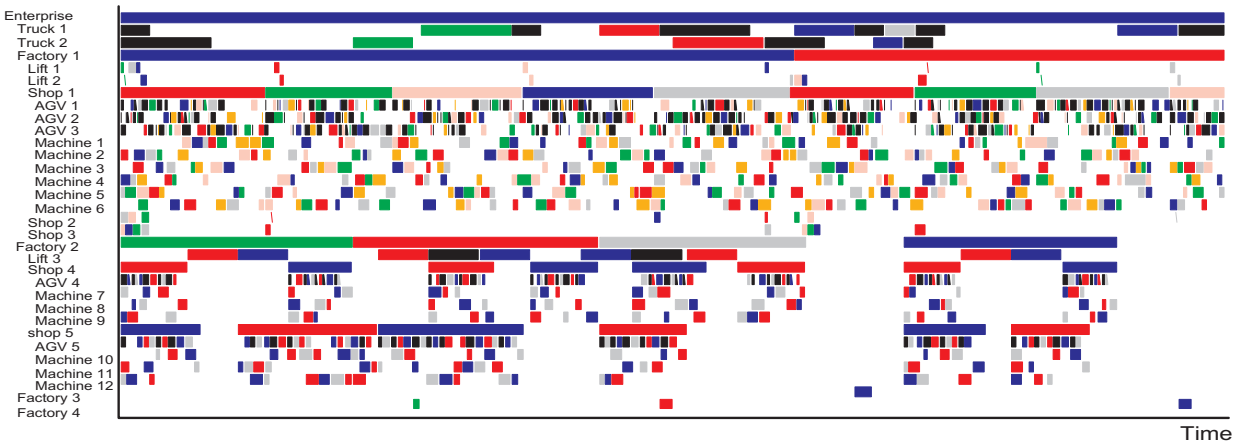


図 5.15: An example of decentralized scheduling in the hierarchical manufacturing system

次により複雑な構造を有する生産システムに対して、提案する手法を適用した結果を示す。図 5.14 に対象とする生産システムの模式図を、また表 5.1 に要素間の関係を示す。対象とするシステム要素は、それぞれ他のシステム要素と包含関係を有している。表に示すように、各システム要素の構造は同じである必要はなく、システム要素および要素間の階層数を変えてある。

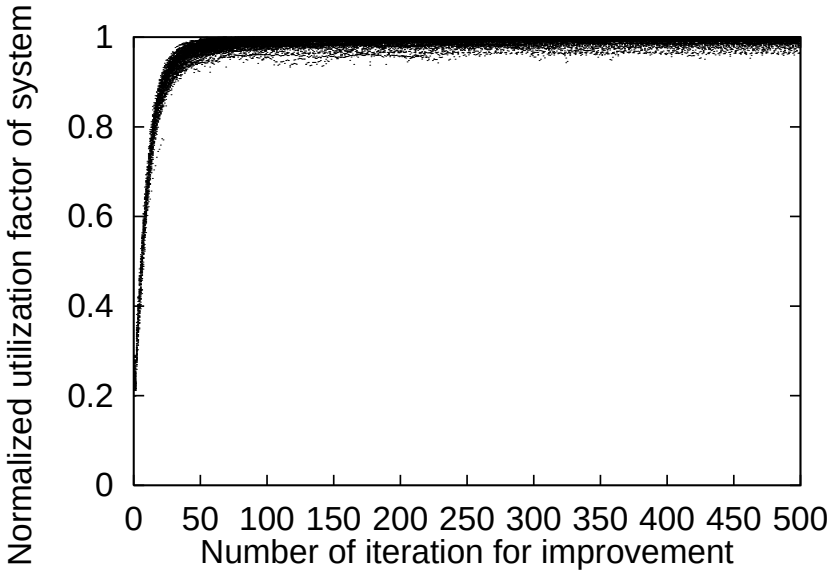


図 5.16: Summary of convergence process

図 5.15 に乱数により作成したスケジューリング問題 100 題に対して行ったスケジュール結果の 1 例を示す。ここでは、各システム要素が 500 回のスケジュールの改善を行った後に得られたスケジュールを示している。また、図 5.16 に、100 題の問題に対する改善過程を示している。ここでは、最上位である企業の稼働率の変化を示している。稼働率は、個々のシステム要素によって処理される作業の処理時間の総和を、すべての処理を終えるまでの時間の総和で除した値を用いている。ただし、各スケジュール毎に最終的に得られる稼働率の値は異なるため、500 回目の試行後に

得られた稼働率の値を用いて基準化を行っている。

これらの図から、比較的複雑なシステム要素から成る生産システムに対して、妥当なスケジュールが得られていることが理解できる。また各システム要素が自らの行動の結果を適切に判断し、システム全体のスケジュールが改善されていることが確認できる。

5.5 システムの柔軟性・頑強性と再帰的伝播法

生産活動を行う場合に、必ず考慮に入れなくてはならない事柄として、製品に要求される品質と製造に要するコストの 2 点があげられる。加工技術や組み立て技術などのいわゆる製造技術は、品質とコストの両方に密接な関係があり、かつ両者に直接的に与える影響が大きいと考えられる。そのことは、ある程度自明と受け止めることもできるが、従来の技術の改善あるいは新しい技術の開発が永続的に行われていることからも推し量ることができる。一方、加工品の搬送や保管などに代表される行為は、製造技術とは異なり、製品の品質に対する直接的な影響はなく、製品のコストに対してのみ直接的な影響を与える。工場内でのこれらの行為は製品に対して付加的な価値をいっさい与えないために、基本的には削減されるべき行為と考えられる。一般にこのような行為は、機械の配置や管理方法などを検討することにより、削減するための努力がなされている。第 2 章で述べたように、生産システムは、機械の配置や管理方法の枠組みの在り方によって特徴づけることが可能である。対象とする生産活動に対して適切な枠組みを与える生産システムは、管理者が加工物の流れと情報の流れに対して理解することを助けるため、 搬送や保管などの行為の省略を可能にし、結果として、製造技術がもたらす恩恵を最大限に引き出すことを可能にする点に意義がある。

製品に対するコストの要求はどのような場合にも無視できないが、その他の前提条件がかわると、生産システムの形態は異なったものとなる。第 2 章で簡単に論じたように、高品質の製品の安定した供給を実現するためには、専用の測定具および専用の加工機が要求されていた。専用の加工の開発には費用が必要となったが、大量生産が望まれているという前提条件が、工廠あるいはフォード型の生産システムの形態を許容した。

次世代の生産システムには、柔軟性 (flexibility) と頑強性 (robustness) が前提条件としてあげられることが多い。 この背景には、消費者の嗜好の違いが異なった仕様の製品を欲するが故に、大量生産を前提に生産活動を行うことはできないことがあげられる。

さて本論文では、柔軟性とは同じ生産設備を利用して、あるいは新たな設備投資を行うことなく、異なった工程を必要とする製品を作りだすことができる機能のことを指すものとする。一方頑強性とは、機械などの故障が生じても、やはり新たな設備投資を行うことなく当初の生産計画を達成することができる機能のことを指すものとする。新たな設備投資には 2 つの問題がある。ひとつは生産設備に対する投資による製造コストの増加を意味し、もうひとつは設備導入までの時間が原因となりビジネスチャンスをつかみ損なうことである。迅速性 (agility) を生産システムの重要な機能としてあげる動きもあるが、これは、柔軟性あるいは頑強性に共通して求められる前提条件であり、コストの増加あるいはビジネスチャンスの喪失を防ぐための必要条件と考えると理解しやすい。

本論文では、生産システムの特徴を物の流れと情報の流れに着目して分類している。ここで、柔軟性あるいは頑強性が如何にして実現されるのかを考えると、個々の生産システムの特徴を理解する助けになると考えられる。

柔軟性を実現するためには、さまざまな方法が考えられるが、代表的な方法のひとつは使用する

生産設備の機能をあらかじめ汎用的なものにしておくことである。たとえば、典型的な機械加工を行う工作機械は、被削材の高速回転を前提とする旋盤と、工具の高速回転を前提とするフライス盤あるいはマシングセンタがあげられる。それぞれいわゆる軸物の製品と角物の製品を加工することを得意とする。これに対して、高速回転が可能な割り出しテーブルを有する 5 軸のマシンニングセンタは、両者の加工を 1 台の機械で行うことができる。このような生産設備を準備することは、初期投資に費用がかかることが予想されるが、明らかに異なった加工工程を必要とする製品に対して柔軟に対応することができ、費用の回収に関しても不可能といいきることはできない。また、ここではシステムを構成する要素として工作機械を取り上げているが、より単純な機能をもつシステム要素を準備しておき、必要に応じて組合わせを変えることにより、望まれる機能をもつ工作機械を準備する考えもある。いわゆる生物指向型生産システムには、このような検討を行うものがある。またモジュール型工作機械などの検討 [11] もこの例に属する。その他に、加工工程に工夫をすることで、既存の設備で対応するようなことも考えられる。

一方、頑強性を実現するための手段のもっとも安易な方法は、余剰な生産設備を保有することである。すべての生産設備を複数台所有し、低い稼働率で運営されている工場は、いかなる形態の生産システムであろうと頑強性が高くなるのは自明である。余剰な生産設備をもつことは頑強性が増す一方で初期投資に起因する製造コストの増加の一因にもなる。そのため、一般的には受け入れがたい対策と受け止められるかもしれないが、頑強性を実現するための最も基本的な対応のひとつである。たとえば、柔軟性を確保するための手段としてあげた、単順な機能をもつ多数の要素の結合によって設備を構築する例やモジュール型の生産設備の例は、生産設備を余剰に持つよりは少ない投資で、余剰な要素を確保することが可能になる。その他にも、故障のおきにくい設備を開発することや、故障が生じた場合にメンテナンス作業のしやすい生産設備を設計することも頑強性を実現する上で有効な手段のひとつである。

本論文で研究の基礎となるホロニック生産システムの概念は、システムとシステム要素との関係を見直している点に特徴があることはすでに述べたとおりである。また頑強性や、ときには柔軟性を実現する上で重要な役割を果たす生産設備の冗長性を、自らが所属するシステム以外のシステムに求めることで、設備保持の無駄の削減とと冗長性の確保を実現することが可能であることについてもすでにまとめたとおりである。

ところで、再帰的伝播法は、機械が割り付けられた作業の処理時刻を、予定していた時刻から変更した場合に、他の機械が変更に合わせて各々の作業の処理時刻を調整すると同時に、その変更が全体に与えた影響を定量的に把握するための情報交換手順に関するものである。本論文では、作業の処理時刻の変更時の処理を中心にスケジュールの準最適化の方法について整理しているが、提案する方法は、作業の初期割り付け時や、作業を受け持つ機械を変更した場合の影響を把握したい場合にも適用可能であることについても前章で触れている。生産システムを運営する際には、システム内の機械をすべて利用し、可能な限り早く処理をすることが常に最適とは限らない。就業時間内は、機械は稼働し続けることが重要であり、生産活動に必要の無い機械は稼働させない方が好ましいはずである。このような機械は、機械の追加を必要とする他のシステムで利用することが可能になる。システム要素間の結合関係だけでなく、システム同士の結合関係も同時に考慮に入れるホロニック生産システムの利点はこの点にある。再帰的伝播法は、このような枠組みのなかで、 活動を休止させるための作業割り付け変更や、休止させる機械の選別などの動作を可能にする情報交換技術のひとつと位置づけることが可能である。

5.6 結言

本研究では、システムを構成する要素間の包含関係に着目し、複雑な構造を有する生産システムのスケジューリングのために必要な情報交換方法の提案を行った。ここではスケジューリング問題を例題に、システムとシステム要素としての工作機械の振る舞いに着目したが、このことは全てのロボットや搬送機、あるいはセル、ショップ、工場などすべての生産設備について考えることが可能である。このとき、システム要素の行動は以下の点について分析すれば良いことが理解できる。

1) 同じ位にある他のシステム要素との関係
2) そのシステム要素が所属する上位のシステムとの関係
3) 自分をシステムとしてみたとき、自分を構成する下位のシステム要素との関係

ここで自分が同位のシステム要素に対して取る行動は、自分が同位のシステム要素から受ける行為になる。同様に、自分が下位の要素にして取る行動は、自分が上位の要素から受ける行為になり、また自分が上位の要素に対して取る行動は、下位の要素から受ける行為になることに注意を払う必要がある。このように、自分の上下の位置に存在するシステム要素（またはシステム）との関係を明確にしておけば、システムの規模が大きくなっても、同じ手法でシステムを制御することが可能になる。

研究の内容をまとめると以下のようになる。

(1) システムの包含関係に基づき、システムとシステム要素の関係を明らかにし、階層型生産システムのスケジューリング手順を提案した。

(2) 再帰的伝播法と名付けた情報交換方法を提案し、分散管理されたシステム要素のスケジューリングに必要な処理手順を明らかにした。

(3) 階層型生産システムのスケジュールについて、計算機シミュレーションによる検討を行い提案する手法の有効性を示した。

参考文献

[1] John F.Muth and Gerald L.Thompson, Industrial scheduling, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1963.

[2] 関根知明, スケジューリングの理論, 日刊工業新聞社, 1971.

[3] J. Calrier and E. Pinson, An algorithm for solving the job-shop problem, Management Science, Vol.35, No.2, pp.164-176, 1989.

[4] 森欣司, 宮本捷二, 井原廣一, 自律分散概念の提案, 電気学会論文誌 C, Vol.104, No.12, pp.303-311, 1984.

[5] 森脇俊道ほか 3 名, 自律分散型生産システムの設計と運用に関する研究, 日本機械学会論文集 C, Vol.58, No.549, pp.1674-1679, 1992

[6] 馬殿英, 大場史憲, 李金良, 自律分散型リアルタイムスケジューリングのためのカラーペトリネットによるモデル化手法, 日本機械学会論文集 C, Vol.63, No.616, pp.4402-4409, 1997

[7] 田村信介ほか 3 名, 分散スケジュールの一方式, 電気学会論文誌 C, Vol.109, No.4, pp.291-298,1989.

[8] 三上貞芳, 嘉数侑昇, 確率的ルールによる動的タスク割当問題へのアプローチ, 日本機械学会論文集 C,Vol.58, No.551, pp.2276-2281, 1992.

[9] 谷水義隆, 杉村延広, 岩田一明, 生産システムの多目的モデリングに関する研究, 日本機械学会論文集 C,Vol.65, No.632,pp1725-1730, 1999.

[10] 樋野励, 森脇俊道, 再帰的伝播法による分散型生産ジョブショップスケジューリング, 日本機械学会論文集 C, Vol.66, No.647,pp2449-2455,2000

[11] Y.Koren, U.Heisel, F.Jobane, T.Moriwaki, G.Pritschow, G.Ulsoy, Reconfigurable Manufacturing Systems, Annals of the CIRP, Vol. 48, 2, 1999

第6章　結論

本論文では、次世代の生産システムの構築を目的とし、自律分散型の機械加工システムの実現に必要な技術の提案を行った。提案する技術の有効性は、計算機による数値シミュレーションと、パーソナルコンピュータを用いた擬似的な分散型生産システムの構築との両面からその評価を行った。

各章の結論は以下のとおりである。

第 2 章では、代表的な生産システムについて、現存するシステムから未だ実現されておらず提案中のシステムまで、物の流れと情報の流れに着目した分類を行うことで、システムとそのシステムを構成するシステム要素の関係について考察した。ここでの検討結果に基づき、システムとシステム要素に関する問題点について指摘した。すなわちシステムとはシステム要素の集合から成る完全なものであり、システム要素は、それ以上分解できない基本的な存在であるとする生産システムの問題点を明確にした。

また、この点を最初に指摘したホロンの概念に触れ、さらに自律と協調の観点からこの概念を拡張することにより、ホロニック生産システムの提案を行った。特に、本章では、ホロニック生産システムの概念に従うことにより得られる生産システムの特徴についてまとめ、その有効性を指摘した。

第 3 章は、工作機械をシステムとして捕えることで、高度な情報機能を備えた工作機械の構造を明らかにし、およびそのための情報処理の方法および工作機械の動作補償の実現方法について提案した。ここでは、具体的な 2 つの検討結果をもとに、分析した工作機械の構造についてその妥当性の検証を行った。

まず最初に、材料が破壊する際に生じるアコースティックエミッションと呼ばれる現象をコーティング工具に適応し、さらにニューラルネットワークによる情報処理を利用することにより学習機能を備えた工作機械の開発例を示した。この検討により、工作機械が自ら加工を重ねることで、加工中の状態認識結果を向上させることの可能性について示した。

次に、オープンアーキテクチャCNC を搭載した工作機械を利用することで、情報処理の結果に基づいて、指定された加工動作を自律的に補正することが可能な工作機械の構築例を示した。ここでは、工作機械の熱変形を例にあげ、その推定方法と結果に基づいた動作補償方法について整理した。提案する方法は、切削実験によりその妥当性と有効性を示した。

第 4 章では、工作機械が自律的かつ協調的に意思決定を行うことにより、システムを管理する調停者を必要としない生産システムの運営方法の提案を行った。ここでは、工作機械はシステムを構成するシステム要素として位置づけており、スケジューリング問題を例にあげ、工作機械の行う情報処理方法を開発した。開発した再帰的伝播法と名付けた情報交換方法は、機械が割り当てられた作業に対して変更を行った際に、システム全体の作業計画の整合性を保ち、同時にその影響を定

量的に把握するためのものである。この手法を用いることで、機械が自律的にスケジュールの立案を行うことが可能になる。提案する手法は、計算機シミュレーションによって妥当性を証明し、また工作機械に見立てた複数のパーソナルコンピュータを用いて生産システム評価用プラットフォームを構築することにより、実現可能性を検証した。

第 5 章では、第 2 章で提案した生産システムの形態に従ったシステムの構築とその運営方法に関する検討を行った。ここでは、包含関係に基づいた階層的な構造を有する生産システムを取り扱うために、あたらしいスケジューリング問題の定義を行った。また第 4 章で提案した再帰的伝播法を、このシステムを構成するシステム要素とシステムに対して拡張し、その手順について詳述した。提案する手法は、計算機シミュレーションによってその妥当性を検証した。